



Siru Kekkonen

Hiedanrannan alueellinen energiaselvitys

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 6.10.2017

Valvoja: Professori Risto Lahdelma

Ohjaaja: DI Jussi From

Tekijä Siru Kekkonen

Työn nimi Hiedanrannan alueellinen energiaselvitys

Koulutusohjelma Energia- ja LVI-tekniikka

Pää-/sivuaine Energiatekniikka

Koodi K3007

Työn valvoja Professori Risto Lahdelma

Työn ohjaaja(t) DI Jussi From

Päivämäärä 6.10.2017

Sivumäärä 88

Kieli suomi

Tiivistelmä

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia ja selvittää elinkaarikustannuksiltaan kannattavin lämmitys- ja jäähdytysratkaisu Tampereen uuden kaupunginosan, Hiedanrannan, alueelle. Tutkittavina vaihtoehtoina ovat kaukolämpö ja kaukojäähdytys, kaukolämpö ja koneellinen jäähdytys, maalämpö ja maaviileä sekä kaukolämpö ja vesistöjäähdytys. Tämän lisäksi vertaillaan eri vaihtoehtojen hiilidioksidipäästöjä sekä tutkitaan aurinkosähkön hyödyntämismahdollisuuksia. Elinkaarikustannusvertailu toteutetaan 25 vuoden ajanjaksolla. Työn tutkimusosassa hyödynnetään kahta näkökulmaa – yhtä kerrostaloa sekä koko korttelia.

Tutkimusmenetelminä työssä käytettiin kirjallisuuskatsausta sekä asiantuntijoiden haastatteluja. Kirjallisuuskatsauksen aineistona hyödynnettiin tieteellisiä artikkeleita ja tutkimusraportteja. Tutkimusosan energiankulutukset ja tehontarpeet saatiin simuloimalla valitut rakennukset IDA ICE –simulointiohjelmalla sekä RIUSKA-simulointiohjelmalla.

Työn tutkimustuloksista saatiin paljon tietoa energiantuotantovaihtoehtojen kustannuksista sekä ympäristövaikutuksista. Maalämmön ja maaviileän elinkaarikustannukset kerrostalotapauksessa olivat alkuvuosina suurimmat johtuen suuremmasta alkuinvestoinnista. Maalämpö ja maaviileä osoittautui kuitenkin 25 vuoden elinkaarikustannusvertailussa edullisimmaksi energiantuotantovaihtoehdoksi, ja järjestelmä saavutti kokonaiskustannuksissa muut järjestelmät jo kuudennen vuoden aikana.

Korttelitapauksessa kaukolämmön ja vesistöjäähdytyksen sekä maalämmön ja maaviileän elinkaarikustannukset olivat suurimmat johtuen jälleen järjestelmien suuremmista alkuinvestoinneista. Tässäkin tutkimustapauksessa maalämpö ja maaviileä osoittautui 25 vuoden elinkaarikustannusvertailussa edullisimmaksi energiantuotantovaihtoehdoksi, ja saavutti kokonaiskustannuksissa muut järjestelmät viimeistään 11. vuoden aikana.

Molemmissa tutkimustapauksissa maalämmön ja maaviileän järjestelmä aiheutti vähintään hiilidioksidipäästöjä.

Toteutettu tutkimus aurinkosähkön hyödyntämismahdollisuuksista osoitti, että sekä kerrostalon että toimistorakennuksen aurinkosähköjärjestelmät maksavat itsensä takaisin 16 vuoden jälkeen, mikäli energiainvestointitukea ei huomioida. Jos tuki huomioidaan, järjestelmien takaisinmaksuaika on 12 vuotta.

Avainsanat energiatehokkuus, uusiutuva energia, hiilidioksidipäästöt, maalämpö, maaviileä, vesistölämpö, vesistöjäähdytys, kaukolämpö, kaukojäähdytys, aurinkoenergia, aurinkosähkö

Author Siru Kekkonen

Title of thesis Hiedanranta regional energy review

Degree programme Energy and HVAC-Technology

Major/minor Energy Technology

Code K3007

Thesis supervisor Professor Risto Lahdelma

Thesis advisor(s) Jussi From, M.Sc. (Tech.)

Date 6.10.2017

Number of pages 88

Language Finnish

Abstract

The purpose of this master's thesis is to study and find out the most cost-effective heating and cooling solution for Hiedanranta, a new neighbourhood in Tampere. The alternatives to be considered are district heating and district cooling, district heating and mechanical cooling, geothermal heating and geothermal cooling, and district heating and water source cooling. In addition, we compare the carbon dioxide emissions of the considered alternatives and also explore the potential for utilization of solar power. Life cycle cost comparison is implemented over a period of 25 years. The research part of the thesis utilizes two perspectives – one block of flats and the whole block.

As a research method, literature review and expert interviewing were used. As a material for the literature review, scientific literature and research reports were used. The energy consumptions and power needs of the research part were obtained by simulating selected buildings using IDA ICE simulation program and RIUSKA simulation program.

From the research results was obtained a lot of information on the cost of energy production alternatives and environmental impacts. The life cycle cost of geothermal heating and geothermal cooling in the block of flats –case was the highest in the beginning due to higher initial investment. However, in the 25 years of life cycle cost comparison, geothermal heating and geothermal cooling proved to be the most cost-effective alternative to produce energy and the system reached other systems in total costs already during the sixth year.

In the block case, both the district heating and water source cooling and geothermal heating and geothermal cooling life cycle costs were the highest in the beginning due to the higher initial investments. Also in this case, geothermal heating and geothermal cooling proved to be the most cost-effective energy production option for 25 years of life cycle cost comparison and the system reached other systems in total costs at the latest during the 11th year.

In both cases, the geothermal heating and geothermal cooling systems caused least carbon dioxide emissions.

The study on the potential for utilization of solar power proved that the payback period for solar power systems in both the block of flats and the office building is after 16 years without the energy investment aid. If the aid is taken into account, the system will pay for itself after 12 years.

Keywords energy efficiency, renewable energy, carbon dioxide emissions, geothermal heating, geothermal cooling, water source heating, water source cooling, district heating, district cooling, solar energy, solar power

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Granlund Tampere Oy:ssä kevään ja syksyn 2017 aikana. Diplomityön ovat rahoittaneet Granlund Tampere Oy sekä Tampereen Sähkölaitos Oy. Työn aiheeksi valikoitui Tampereen uuden kaupunginosan, Hiedanrannan, alueellinen energiaselvitys. Työn aiheen valikoituminen oli luontevaa sen liittyessä läheisesti tekemiini työtehtäviin Granlund Tampere Oy:ssä, minkä lisäksi nähtiin selkeä tarve vertailla eri energiantuotantomuotojen elinkaarikustannuksia.

Suuret kiitokset kuuluu työni ohjaajalle Jussi Fromille, joka ohjasi tämän mielenkiintoisen työn, sekä tuki ja kannusti minua koko diplomityöprosessin ajan. Kiitokset kuuluvat myös kollegalleni Juho Lähteenmäelle, joka perehdytti minut RIUSKA-ohjelman käyttöön sekä neuvoi ja auttoi aina tarvittaessa. Kiitos Jussi ja Juho myös piristävistä kahvipöytäkeskusteluista, joiden ansiosta jaksoi taas työskennellä diplomityön parissa. Kiitos myös muille työkavereilleni, jotka osaltaan auttoivat minua työn edetessä.

Haluan kiittää Tampereen Sähkölaitosta tämän työn mahdollistamisesta yhdessä Granlund Tampere Oy:n kanssa. Erityiskiitos Sähkölaitoksen Timo Heikkilälle, Christian Geigerille sekä Samu Lepistölle.

Haluan myös kiittää professori Risto Lahdelmaa, joka toimi valvojana tässä työssä.

Lopuksi haluan vielä kiittää perhettäni ja läheisiäni suuresta tuesta. Kiitos miehelleni Tommille, joka on ollut korvaamaton kannustaja ja tuki diplomityöprosessin ajan. Suuri kiitos myös Nasulle ja Tuhtille.

Tampereella 6.10.2017

Siru Kekkonen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Lyhenteet ja termit

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 1.1 | Tausta | 1 |
| 1.2 | Työn tavoitteet | 1 |
| 2 | Energiatehokas asuinalue | 3 |
| 2.1 | Rakentamismääräykset | 3 |
| 2.2 | Alueellinen energiatase | 4 |
| 2.3 | Lähes nollaenergiarakennus (nZEB) | 6 |
| 3 | Alueelliset energiantuotantovaihtoehdot | 7 |
| 3.1 | Geoenergia | 7 |
| 3.1.1 | Maaperään asennettava keruuputkisto | 9 |
| 3.1.2 | Porakaivoon asennettava keruuputkisto | 10 |
| 3.1.3 | Vesistöön asennettava keruuputkisto | 12 |
| 3.1.4 | Maalämpöpumpun toimintaperiaate | 13 |
| 3.1.5 | Viilentäminen maalämpöpumpulla | 14 |
| 3.1.6 | Maalämpöpumpun hyötysuhde | 15 |
| 3.1.7 | Päästöt | 15 |
| 3.1.8 | Maalämpö Suomessa | 17 |
| 3.2 | Kaukolämpö | 19 |
| 3.2.1 | Kaukolämmön tuotanto | 21 |
| 3.2.2 | Kaukolämmön polttoaineet ja päästöt | 22 |
| 3.2.3 | 4. sukupolven kaukolämmitys | 24 |
| 3.2.4 | Kaukojäähdytys | 27 |
| 3.2.5 | Kaukolämpö ja -jäähdytys Tampereella | 29 |
| 3.3 | Koneellinen jäähdytys | 32 |
| 3.3.1 | Suora ja välillinen jäähdytysjärjestelmä | 32 |
| 3.3.2 | Lauhduttimet | 34 |
| 3.3.3 | Kylmäaineet | 34 |
| 3.4 | Aurinkoenergia | 34 |
| 3.4.1 | Auringonsäteilyä vastaanottavan tason sijoittaminen | 35 |
| 3.4.2 | Aurinkokennot | 36 |
| 3.4.3 | Aurinkoenergia Suomessa | 40 |
| 4 | Hiedanrannan aluetarkastelu | 43 |
| 4.1 | Aluetarkastelua ohjaavia tekijöitä | 43 |
| 4.1.1 | Energia- ja ilmastopolitiikka | 43 |
| 4.1.2 | Tampereen kasvihuonekaasupäästöt ja energiatase | 44 |
| 4.1.3 | Maankäytön ja rakentamisen lainsäädäntö | 48 |
| 4.2 | Case Hiedanranta | 50 |
| 4.2.1 | Lähtötiedot ja oletukset | 50 |
| 4.2.2 | Asuinkerrostalon energiankulutus ja tehontarpeet | 53 |
| 4.2.3 | Korttelin energiakulutus ja tehontarpeet | 57 |
| 4.2.4 | Energiatuotannon hiilidioksidipäästöt | 61 |
| 4.3 | Hiedanrannan energiantuotanto | 62 |
| 4.3.1 | Vaihtoehto 1: Kaukolämpö ja kaukojäähdytys | 62 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.3.2 | Vaihtoehto 2: Kaukolämpö ja koneellinen jäähdytys | 64 |
| 4.3.3 | Vaihtoehto 3: Maalämpö ja maaviileä | 66 |
| 4.3.4 | Vaihtoehto 4: Kaukolämpö ja vesistöjäähdytys | 68 |
| 4.3.5 | Energiantuotantotarkastelun yhteenveto | 69 |
| 4.3.6 | Aurinkosähkön hyödyntäminen | 73 |
| 5 | Johtopäätökset | 78 |
| | Lähdeluettelo | 80 |

Lyhenteet ja termit

Kemialliset yhdisteet:

| | |
|------------------|---|
| CFC, HCFC | chlorofluorocarbons, kloorifluorihiilivedyt |
| CH ₄ | metaani |
| CO ₂ | hiilidioksidi |
| N ₂ O | dityppioksidi |
| NO _x | typpioksidi |
| R134a | tetrafluorietaani, kylmäaine |
| R22 | klooridifluorimetaani, kylmäaine |
| R410A | kylmäaine |

Lyhenteet:

| | |
|-----------------------|---|
| 4GDH | 4th Generation District Heating, 4. sukupolven kaukolämpö |
| BREEAM | Building Research Establishment Environmental Assessment Method, rakennusten kansainvälinen ympäristöluokitus |
| CO ₂ -ekv. | hiilidioksidiekvivalentti |
| COP | Coefficient of Performance, hyötysuhde |
| IDA ICE | IDA Indoor Climate and Energy -simulointiohjelma |
| LIISA | VTT:ssä kehitetty Suomen tieliikenteen päästölaskentamalli |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration, ilmailu- ja avaruushallintovirasto |
| RakMK | Suomen rakentamismääräyskokoelma |
| TYKO | VTT:ssä kehitetty Suomen työkoneiden päästölaskentamalli |
| VAHTI | Ympäristöhallinnon valvonta ja kuormitustietojärjestelmä |
| VTT | Teknologian tutkimuskeskus, ent. Valtion teknillinen tutkimuskeskus |
| YM | Ympäristöministeriö |
| nZEB | nearly zero-energy building, lähes nollaenergiarakennus |

1 Johdanto

Energiatehokkuus on otettava huomioon kaikessa toiminnassa niin taloudellisuuden kuin ympäristönkin kannalta. Lokakuussa 2014 Eurooppa-neuvostossa päätettiin vuoden 2030 energia- ja ilmastotavoitteista. Tähän sisältyi tavoite vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 40 % vuoden 1990 tasoon nähden, nostaa uusiutuvan energian osuus 27 %:iin sekä parantaa energiatehokkuutta EU-tasolla vähintään 27 %. Euroopan unioni antoi myös kesällä 2016 ehdotuksen, jonka mukaan jäsenvaltioiden tulisi vähentää päästökaupan ulkopuolisia kasvihuonekaasupäästöjä vuosina 2021-2030. Suomen päästövähennykseksi ehdotettiin 39 %. (YM 2013, EK.)

1.1 Tausta

Tampereella on oma ilmastostrategiansa pohjautuen EU-direktiiveihin, hallituksen ilmasto- ja energiastrategiaan sekä valtakunnallisiin linjauksiin – ”Hiilineutraali Tampere 2050”. Tavoitteena on Tampereen kaupunkiseudun kokonaispäästöjen 30 % vähennys vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasosta sekä samaiseen vuoteen mennessä 40 % vähennys CO₂-päästöihin asukasta kohden. Vuoden 2050 tavoite on hiilineutraalisuus, mikä tarkoittaa 80 % hiilidioksidipäästöjen vähennystä ja lopun 20 % sitomista kasvillisuuteen. (Tampereen kaupunki d.)

1.2 Työn tavoitteet

Diplomityön tutkimuskohteeksi valittiin Tampereen uusi kaupunginosa Hiedanranta. Työn tarkoituksena on selvittää eri lämmitys- ja jäähdytysvaihtoehtoista niin yhdelle kerrostalolle kuin koko korttelille elinkaarikustannuksiltaan kannattavin ratkaisu ottaen huomioon myös eri vaihtoehtojen CO₂-päästöt. Työssä tutkitaan seuraavia vaihtoehtoja:

- kaukolämpö ja kaukojäähdytys
- kaukolämpö ja koneellinen jäähdytys (rakennuskohtaiset jäähdytyskoneet)
- maalämpö ja maaviileä
- kaukolämpö ja vesistöjäähdytys
- kaikissa vaihtoehtoissa matalalämpöverkko.

Työn avulla saadaan tietoa kyseisen alueen energiantuotannosta vastaavalle taholle, kuinka kustannustehokkaita eri ratkaisut ovat sekä kuinka paljon hiilidioksidipäästöjä kukin vaihtoehto tuottaa, kun tutkittavana kohteena on yksi kerrostalo tai koko kortteli.

Tämän lisäksi tutkitaan aurinkosähkön hyödyntämismahdollisuuksia.

Työssä selvitetään myös, kannattaako yksittäisen talonyhtiön tehdä investointeja CO₂-päästöjen pienentämiseksi, mikäli paikallisella energiayhtiöllä on tavoitteena olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä.

Tutkimus jakautuu kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa selvitetään yhden kerrostalon sekä korttelin laskennalliset kokonaisenergiankulutukset sekä tehontarpeet. Alueellisen energiaselvityksen toisessa vaiheessa tehdään valituille energiantuotantovaihtoehtoilta kustannus- ja kannattavuusanalyysit ensimmäisen vaiheen myötä asetettujen suuntaviivojen perusteella. Kustannus- ja kannattavuusanalyysit tehdään budjettitarjous-tasoisilla hintatiedoilla.

Eri energiantuotantovaihtoehtoja tutkiessa täytyy huomioida seuraavia tutkimuskysymyksiä:

- Onko alueella valmiina kaukolämpöverkosto?
- Onko alueella valmiina kaukojäähdytysverkosto?
- Minkälainen on maaperän rakenne?
- Kuinka suuri pinta-ala on käytettävänä maalämpöratkaisuille?
- Kuinka suuri etäisyys on rakennusten ja vesistön välillä?
- Minkälainen on vesistön syvyyskäyrä?
- Minkälainen on rakennuksen katon malli? Potentiaalinen kattopinta-ala aurinkosähkölle?

2 Energiatehokas asuinalue

Alueille ei toistaiseksi ole olemassa mitään virallisia energiatehokkuusmääräyksiä kuten rakennuksille. Alueen energiatehokkuutta lähestytään enemmänkin kokonaistehokkuuden tai yksittäisen rakennuksen näkökulmasta. Energiatehokas asuinalue voidaan kuitenkin käsittää esimerkiksi alueena, joka on viihtyisä, kustannustehokas ja jonka energiankulutus on lähellä nollaa. Huomioitavia asioita ovat myös investointi- ja käyttökulujen optimointi, hiilidioksidipäästöjen vähentäminen sekä puhtaiden ja taloudellisesti kilpailukykyisten lämmön ja sähkön tuotantoratkaisujen, kuten aurinkoenergian, maalämmön, tuulienergian ja bioenergian, edistäminen. Energiatehokkaiden asuinalueiden suunnittelu riippuu niille asetetuista tavoitteista.

2.1 Rakentamismääräykset

Suomen rakentamismääräyskokoelman rakennusten energiatehokkuutta käsittelevä osa D3 sisältää määräyksiä ja ohjeita rakennusten energiatehokkuudesta ja koskee vain uusia rakennuksia. Rakennukset ja tilat, joita määräykset ja ohjeet koskevat, on jaoteltu yhdeksään luokkaan:

- Luokka 1: Erilliset pientalot sekä rivi- ja ketjutalot
- Luokka 2: Asuinkerrostalot
- Luokka 3: Toimistorakennukset
- Luokka 4: Liikerakennukset
- Luokka 5: Majoitusliikerakennukset
- Luokka 6: Opetusrakennukset ja päiväkodit
- Luokka 7: Liikuntahallit, uimahallit, jäähallit, liikenteen rakennukset
- Luokka 8: Sairaalat
- Luokka 9: Varastorakennukset ja erilliset moottoriajoneuvosuojat.

Määräykset eivät kuitenkaan koske esimerkiksi

- alle 50 m² rakennuksia
- teollisuus- ja korjaamorakennusta
- kasvihuonetta, väestönsuojaa tai muuta rakennusta, mikäli tarkoituksenomainen käyttö vaikeutuisi energiatehokkuutta koskevien säännösten ja määräysten noudattaessa
- loma-asumiseen tarkoitettua rakennusta, jota ei käytetä majoituselinkeinojen harjoittamiseen.

(YM 2016b.)

Listaa rakennuksista, joita energiatodistusvelvoitteet eivät koske, on muutettu 1.7.2016 voimaan tulleella lailla. Nykyään energiatodistusvelvoite koskee myös esimerkiksi uimahalleja, jäähalleja, varastorakennuksia, liikenteen rakennuksia ja erillisiä yli 50 m² moottoriajoneuvosuojia. (YM 2016b.)

Jos rakennuksella on useampi eri käyttötarkoitus, jaetaan se osiin käyttötarkoituksiluokkien mukaisesti. Mikäli kuitenkin rakennuksen osan lämmitetty nettoala on alle 10 % koko rakennuksen lämmitetystä nettoalasta, voidaan se laskea mukaan rakennuksen energiatodistukseen. (YM 2016b.)

Energiatodistuksessa energiatehokkuuden luokittelu pohjautuu rakennuksen kokonais-energiankulutukseen, E-lukuun. Sillä kuvataan rakennuksen energiankäytön vaikutuksia ympäristöön ja luonnonvaroihin. E-luku kertoo eri energiamuotojen kertoimilla painotetun ostoenergiankulutuksen lämmitettyä nettoalaa kohden vuodessa ($\text{kWh}_E/(\text{m}^2 \text{ vuosi})$). Kertoimista voidaan nähdä, että sähköä ja fossiilisia polttoaineita säästämällä saadaan paras hyöty energiansäästöstä.

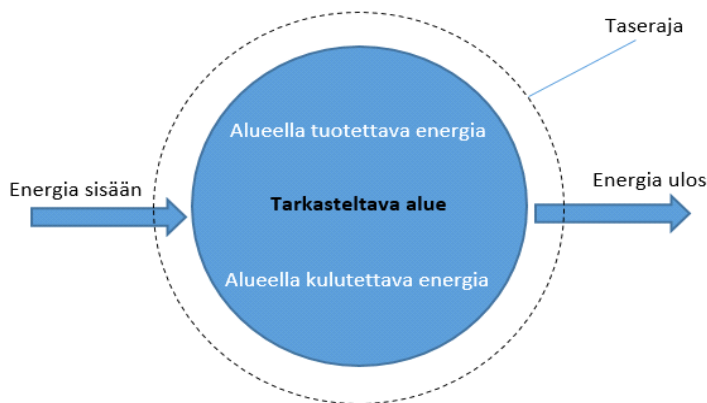
Energiamuotojen kertoimet ovat

| | |
|---|------|
| - kaukolämpö | 0,7 |
| - sähkö | 1,7 |
| - fossiiliset polttoaineet (esim. öljy) | 1,0 |
| - uusiutuvat polttoaineet (esim. puupelletti) | 0,5 |
| - kaukojäähdytys | 0,4. |

(YM 2016b.)

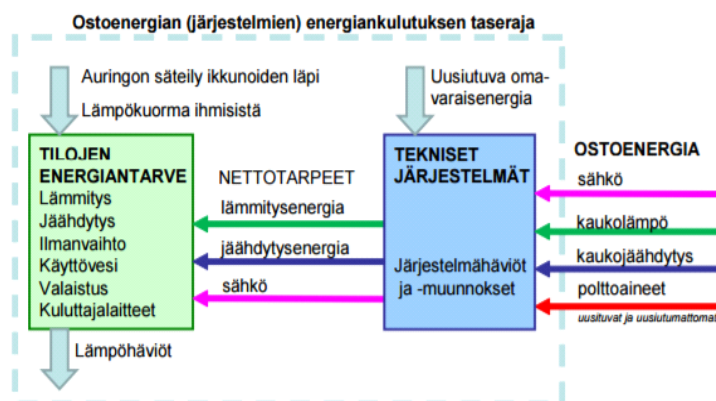
2.2 Alueellinen energiatase

RakMK D3-määräykset pohjautuvat tasemalliajatuksen hyödyntämiseen. Alueen energiatase tarkoittaa taserajan yli siirtyvää energiaa ja alueen sisäpuolella tuotettavaa sekä kulutettavaa energiaa alla olevan kuvan mukaisesti. (Viholainen et al. 2016.)



Kuva 1. Alueen energiatase (Viholainen et al. 2016.)

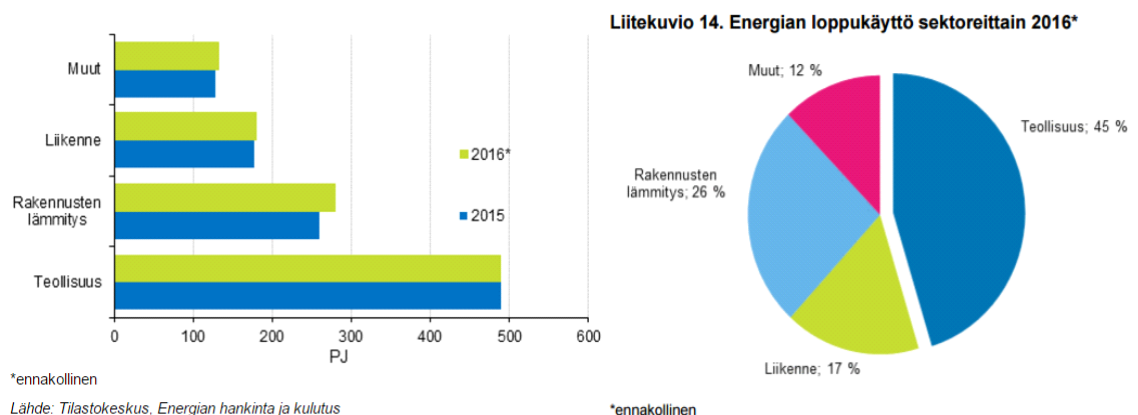
RakMK D3-osassa erotetaan toisistaan rakennuksen uusiutuva omavaraisenergia ja ostoenergiankulutus. Ostoenergiankulutuksella tarkoitetaan osan D3 mukaisesti ”energiaa, joka hankitaan rakennukseen esimerkiksi sähköverkosta, kaukolämpöverkosta, kaukojäähdytysverkosta ja uusiutuvan tai fossiilisen polttoaineen sisältämänä energiana”. Kuvassa 2 on esitetty ostoenergiankulutuksen taseraja. (YM 2011.)



Kuva 2. Ostoenergiankulutuksen taseraja (YM 2011).

Rakennusten energiatehokkuusmääräykset tiukentuvat jatkuvasti, mikä tarkoittaa, että myös alueellinen energiatehokkuus alkaa nousta esiin. Vaikka alueille ei ole vastaavanlaista energialuokitusjärjestelmää kuin rakennuksille eikä määritelmää energiatehokkaasta alueesta ole tehty, voidaan määritellä tietyille alueille tavoitteet ja eri keinoin arvioitu alueen energiatase.

Sara Tuovinen on diplomityössään (2012) luonut alueellisen energiatasemallin, eli laskentatyökalun, jonka avulla voidaan laskea alueen energiatase ja käyttää tietoja apuna alueen energiasuunnittelussa. Laskentamalli pohjautuu rakennusten energiankulutukseen, energiantuotantoon sekä hiilidioksidipäästöihin, koska rakennukset ovat suurin yksittäinen energiankuluttaja rakennetussa ympäristössä kuvien 3 ja 4 mukaisesti. (Tuovinen, Alueellinen energiatasemalli).



Kuva 3 ja Kuva 4. Energian loppukäyttö sektoreittain (Tilastokeskus 2017b).

Rakennuksen energiankulutus sisältää lämmityksen, sähkön käytön sekä jäähdytyksen. Tuovisen luoma malli ei ota huomioon muuta alueellista energiankulutusta, kuten liikennettä tai yhdyskuntaverkkoja. Mallin avulla voidaan laskea niin alueellista kuin alueen rakennusten käyttötarkoituksien mukaista energiankulutusta ja tuotantoa sekä hiilidioksidipäästöjä. E-luku voidaan laskea jokaiselle rakennusten käyttötarkoitukseluokalle sekä alueille, mutta alueen E-luku ei varsinaisesti kerro mitään, koska se ei ole vertailukelpoinen eri alueiden välillä johtuen alueiden erilaisesta rakennuskannasta. (Tuovinen 2012.)

Tuovisen (2012) kehittämän alueellisen energiatasemallin työvaiheet ovat seuraavanlaiset:

1. Simuloidaan rakennustyyppien energiankulutukset esimerkkirakennuksille
2. Lasketaan simulointitietojen perusteella rakennustyyppien ominaisenergiankulutukset sekä ominaistehot
3. Kun alueen eri rakennustyyppien nettoalat ovat selvillä, saadaan Excel-työkalulla alueen energiankulutus laskettua
4. Työkalun kehittäminen alueen energiantuotannon laskemisen mahdollistamiseksi
 - a. rakennuksissa tuotettava energia
 - b. alueella tuotettava energia
 - c. ulkopuolisen ostoenergian tarve
 - d. alueen hiilidioksidipäästöt.

Mallin käyttäminen perustuu paljon oletuksiin ja arvioihin, mikäli tarkkaa tietoa ei ole. Esimerkiksi on tehtävä oletuksia uusiutuvan energian osuudesta rakennuksissa, alueelle tulevien rakennusten rakennustyyppit ja nettoalat. Malli huomioi rakennustyyppien energiankulutuksen ja tehon tarpeen neliötä kohden sekä mihin vuoden ja vuorokauden aikoihin energiankulutus missäkin rakennusten käyttötarkoituksaluokassa tapahtuu. (Tuovinen 2012.)

2.3 Lähes nollaenergiarakennus (nZEB)

Noin 40 % Euroopan unionin kokonaisenergiankulutuksesta aiheutuu rakennuksista, minkä takia rakennusten energiatehokkuutta on kehitettävä. Keskeisimpiä syitä tähän ovat ilmastomuutoksen hillitseminen, energiariippuvuuden vähentäminen sekä energian kysynnän hallitseminen ja toimitusvarmuuden lisääminen. (EUR-Lex 2015, YM 2017.)

Vuoden 2021 alusta tulee voimaan EU-direktiivi, joka edellyttää kaikkien uusien rakennusten olevan lähes nollaenergiarakennuksia (nZEB). Nollaenergiarakennuksen määritelmä on Suomessa vielä hieman kesken. Myöskään nollaenergia-aluetta tai lähes nollaenergia-aluetta ei ole määritelty. (YM 2017.)

Euroopan parlamentin ja neuvoston antaman, rakennusten energiatehokkuutta koskevan, direktiivin (2010/31/EU, s. 6) mukaan lähes nollaenergiarakennus määritellään seuraavasti: ”Lähes nollaenergiarakennuksella tarkoitetaan rakennusta, jolla on erittäin korkea energiatehokkuus, sellaisena kuin se on määritettynä liitteen I mukaisesti. Tarvittava lähes olematon tai erittäin vähäinen energian määrä olisi hyvin laajalti katettava uusiutuvista lähteistä peräisin olevalla energialla, mukaan lukien paikan päällä tai rakennuksen lähellä tuotettava uusiutuvista lähteistä peräisin oleva energia”.

Pelkästään rakennuksen energiankulutustason määrittäminen ei ole yksiselitteistä, saati jos energiankulutus halutaan määrittää alueelle. Alueella voi olla erilaisia ja eri käyttötarkoituksen omaavia rakennuksia, jotka kukin kuluttavat eri määrän energiaa neliötä kohden. Näin ollen alueelle ei ole edes järkevää määritellä samanlaisia energiankulutusrajoja, kuten rakennuksille. Alueellisessa määritelmässä tulisi huomioida alueen eri toiminnot, ja määrittelyn voisi perustaa erilaisiin rakennuksien käyttötarkoitustyyppeihin. (Tuovinen 2012.)

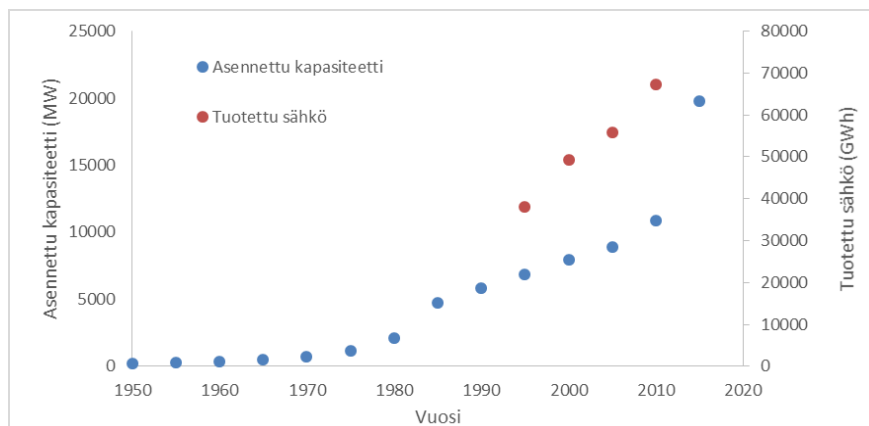
3 Alueelliset energiantuotantovaihtoehdot

3.1 Geoenergia

Uusiutuvien energianlähteiden tärkeys globaaleilla energiamarkkinoilla kasvaa huomattavasti. Ne ovat erittäin merkittävä tekijä CO₂-päästöjen vähentämisessä, kun edistetään energiaturvallisuutta ja parannetaan kestävyyttä. Geoenergia on uusiutuva energialähde, jota voidaan hyödyntää sähköntuotossa, lämmöntuotossa ja jäähdytyksessä niin kotitalouksissa kuin isommissakin rakennuksissa, kuten kouluissa, teollisuudessa ja toimistorakennuksissa. (Bayer et al. 2011.) Tärkein maalämpöpumppujen etu on niiden kyky hyödyntää maaperän ja pohjaveden lämpötiloja 5-30 °C:ssa, joka on yleistä ympäri maailmaa kohtuullisissa syvyyksissä. (Self et al. 2012.) Maalämpöratkaisuilla on potentiaalia vähentää jäähdytysenergiaa 30-50 % ja lämmitysenergiaa 20-40 %. (Sarbu & Sebarchievici 2013.) Vuonna 2010 koko maailman geoterminen kapasiteetti oli 10,898 GW ja tuotettu sähköenergia 67,246 TWh. Taulukossa 1 on esitetty maailmanlaajuisen geotermisen kapasiteetin kehitys vuodesta 1950 vuoteen 2010 ja ennuste 2015 sekä tuotettu energia. Kuvassa 5 esitetty sama kaaviona. (Power et al. 2010.)

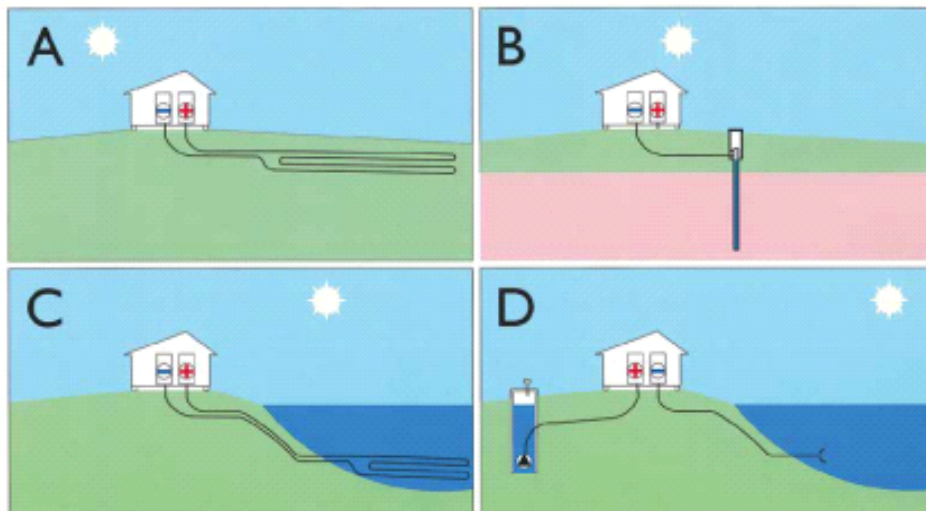
Taulukko 1. Maailmanlaajuinen geoterminen kapasiteetti 1950-2010 sekä ennuste 2015 (Power et al. 2010).

| Vuosi | Asennettu kapasiteetti (MW) | Tuotettu energia (GWh/vuosi) |
|-------|-----------------------------|------------------------------|
| 1950 | 200 | |
| 1955 | 270 | |
| 1960 | 386 | |
| 1965 | 520 | |
| 1970 | 720 | |
| 1975 | 1180 | |
| 1980 | 2110 | |
| 1985 | 4764 | |
| 1990 | 5834 | |
| 1995 | 6833 | 38035 |
| 2000 | 7972 | 49261 |
| 2005 | 8903 | 55709 |
| 2010 | 10898 | 67246 |
| 2015 | 19800 | |



Kuva 5. Maailmanlaajuinen asennettu maalämpökapasiteetti sekä tuotettu sähkö (Power et al. 2010).

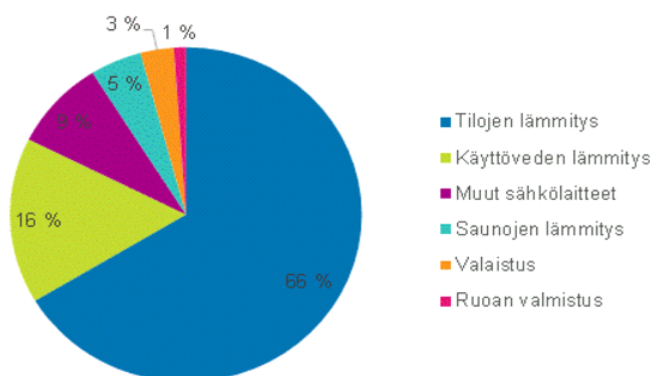
Maalämpöratkaisut voidaan jakaa kahteen tyyppiin: suljetut keruupiirit ja avoimet keruupiirit. Molempien tapauksien ytimenä on lämpöpumppu, joka on suunniteltu tarpeen mukaan joko siirtämään lämpöä pois tai tuomaan sitä systeemissä virtaavan nesteen välityksellä. Suljettu keruupiiri muodostuu lämmönlähteestä, siirtoputkistosta sekä lämmönkeruunesteestä. Suljetut piirit voivat olla joko maan pinnan alle, korkeintaan 2 metriä syvälle, kaivettuja tai veteen sijoitettuja horisontaalisia putkistoja tai kallioperään tai maaperään kaivettuja vertikaalisia putkistoja. Avoin keruupiiri taas kierrättää suoraan pohjavettä kaivosta lämpöpumpulle, jonka jälkeen se palautetaan takaisin pohjavedeksi tai johdetaan pintavesiin. (Sanner et al. 2003, Self et al. 2012, Bayer et al. 2011). Alla on havainnekuvat (A) maapiiristä, (B) porakaivosta, (C) vesistöpiiristä sekä (D) avoimesta keruupiiristä. (Juvonen & Lapinlampi 2013.)



Kuva 6. Havainnekuvat (A) maapiiristä, (B) porakaivosta, (C) vesistöpiiristä sekä (D) avoimesta keruupiiristä (Juvonen & Lapinlampi 2013).

Rakennukset edustavat suurinta ja kustannustehokkainta mahdollisuutta säästää energiaa. Tämän lisäksi tutkimukset ovat osoittaneet, että energiansäästö on kustannustehokkain keino vähentää kasvihuonekaasupäästöjä.

Tänä päivänä rakennusten energiankulutuksesta lähes 80 % kohdistuu tilojen ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen, ja jäähdytyksenkin energiantarve kasvaa vuosi vuodelta. Kuvasssa 7 on esitetty asumisen energiankulutus käyttökohteittain vuonna 2015. (Tilastokeskus 2016c.)



Kuva 7. Asumisen energiankulutus käyttökohteittain vuonna 2015 (Tilastokeskus 2016c).

Ensimmäisen kerran maalämpöpumpun käyttöä ehdotti sveitsiläinen Heinrich Zoelly jo vuonna 1912, mutta tuolloin ajatus ei vielä saanut suurta suosiota. Ensimmäisen kerran mielenkiinto maalämpöpumpputeknologiaa kohtaan alkoi sekä Pohjois-Amerikassa että Euroopassa Toisen maailmansodan jälkeen ja kesti 1950-luvun alkupuolelle, kun kaasun ja öljyn käyttö laajentui lämmitysmuotona. (Sarbu & Sebarchievici 2013.)

Seuraava maalämpöpumpputeknologian kiinnostusryöppy käynnistyi Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa 1970-luvulla ensimmäisen öljykriisin jälkeen korostaen erityisesti kokeellisia tutkimuksia. Seuraavien kahden vuosikymmenen ajan tehtiin merkittäviä pontisteluja porakaivojen oikeanmukaisen asennuksen perustan luomiseksi sekä suunnittelumenetelmien kehittämiseksi. (Sarbu & Sebarchievici 2013.)

Suuri osa globaalista energiantuotosta käytetään sähköntuotantoon tai tilojen lämmitykseen, ja valtaosa tästä on tuotettu fossiililla polttoaineilla. Fossiiliset polttoaineet ovat ehtyvä energianlähde ja niiden polttamisen sivutuotteena syntyvät kasvihuonekaasupäästöt, jotka edistävät ilmastonmuutosta, sekä muut kaasut ovat haitallisia ympäristölle. Energian kysyntä kasvaa koko ajan ja tulevaisuudessa fossiilisista polttoaineista on pulaa. (Self et al. 2012.)

Fossiilisten polttoaineiden lisäksi maankuori sisältää runsain mitoin lämpöenergiaa. Maalämpöjärjestelmät ovat suhteellisen suotuisaa ympäristölle johtuen matalista päästöistä suhteessa tavanomaisiin fossiilisia polttoaineita käyttäviin järjestelmiin. (Self et al. 2012.)

3.1.1 Maaperään asennettava keruuputkisto

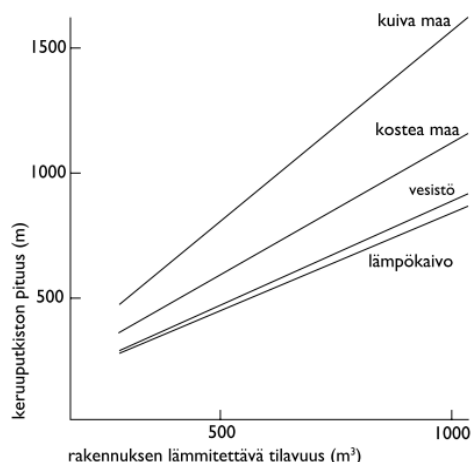
Yksi maalämmön keruutavoista on asentaa lämmönkeruuputkisto vaakatasoon maan pinnan alle noin metrin syvyyteen kuvan 8 mukaisesti.



Kuva 8. Vaakatasoon asennettu lämmönkeruuputkisto (Savonlinnan lämpöpumppu Oy).

Vaakatasoon asennettu keruuputkisto on pientalo-kohteissa lyhimmilläänkin lähes 500 metriä, ja maapiirin vaatima pinta-ala on noin 1,5 m² keruuputkimetriä kohden. Keruuputken pituus ja vaadittu pinta-ala riippuu oleellisesti maaperän laadusta. Esimerkiksi kosteasta savimaasta saadaan enemmän lämpöä kuin kuivasta hiekkamaasta, ja kivinen maaperä ei sovi vaakaputkistolle johtuen roudan liikuttamien kivien mahdollisuudesta

vaurioittaa putkistoa. Oheisessa kuvassa 9 on esitetty suuntaa antava vertailu maalämpöpumpun lämmönlähteiden putkistopituuksista suhteessa rakennuksen tilavuuteen, sekä taulukossa 2 on esitetty maaperän ja sijainnin vaikutus saatavaan lämpömäärään maapiiriratkaisuissa. (Juvonen & Lapinlampi 2013, Motiva 2012.)



Kuva 9. Maalämpöpumpun lämmönlähteiden putkistopituuksia suhteessa rakennuksen tilavuuteen (Juvonen & Lapinlampi 2013).

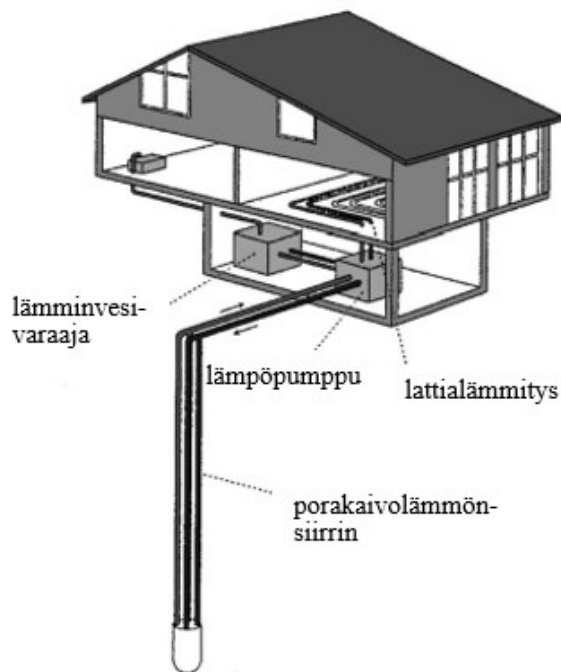
Taulukko 2. Maaperän ja sijainnin vaikutus saatavaan lämpömäärään maapiiriratkaisuissa (Laitinen et al. 2011).

| Sijainti | Maaperän ja sijainnin vaikutus saatavaan lämpömäärään (kWh/m/vuosi) | |
|---------------|---|--------|
| | Savi | Hiekka |
| Etelä-Suomi | 50-60 | 30-40 |
| Keski-Suomi | 40-45 | 15-20 |
| Pohjois-Suomi | 30-35 | 0-10 |

Horisontaalisten maalämpöjärjestelmien haittapuolia ovat herkkyys ilmaston lämpötilavaihteluille johtuen sen sijainnista lähellä maan pintaa sekä järjestelmän suuri vaade maapinta-alalle verrattuna vertikaaliseen maalämpöjärjestelmään. (Motiva 2012.)

3.1.2 Porakaivoon asennettava keruuputkisto

Yleisin maalämmönlähde on nykyään porakaivo. Tyypillinen porakaivosysteemi on esitetty alla olevassa kuvassa. Jokaista kWh lämpöä tai jäähdytystä kohden se vaatii noin 0,22-0,35 kWh sähköä, mikä on 30-50 % vähemmän kuin ilmalämpöpumpun energiankulutus. (Sanner et al. 2003).



Kuva 10. Tyypillinen porakaivosysteemi (Sanner et al. 2003).

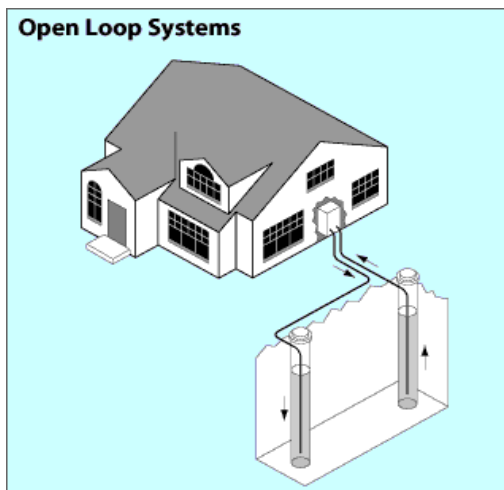
Porakaivoratkaisuissa tietyn tehon tuottamiseen vaadittu keruuputkiston pituus riippuu merkittävästi maaperän ominaisuuksista, kuten lämpötilasta, kosteuspitoisuudesta, hiukkasten koosta ja muodosta sekä lämmönsiirtokertoimesta. Tärkeimpiä tekijöitä energiakaivon mitoituksessa ovat rakennuksen energiantarve, energiakaivon porareian syvyys, porareikien määrä sekä niiden etäisyys toisistaan. (Sanner et al. 2003).

Vertikaalisessa maalämpöpumppujärjestelmässä lämmönsiirrinasennukset voivat sisältää jopa satoja porakaivoja, jotka jokainen on toteutettu joko yleisimmällä vaihtoehdolla, 2-putkijärjestelmällä, tai vaihtoehtoisesti 3- tai 4-putkijärjestelmällä, jonka läpi kiertävä lämmönsiirrinne virtaa. Tyypillisten U-putkien nimellishalkaisija on 20-40 mm ja porareikien syvyys Suomessa vaihtelee 120-300 metrin välillä. Porareikien halkaisijat kalliossa vaihtelevat 105-165 mm välillä. Maakerroksen osuudelle asennetaan suojaputki, joka estää irtoaineksen pääsyn kallioon porattuun reikään sekä pohjaveteen. Suojaputki tiivistetään kallion pintaan esimerkiksi betonilla, manklaamalla, kallioon kiristämällä tai laajenevilla tiivisteaineilla. (Juvonen & Lapinlampi 2013, Sarbu & Sebarchievici 2013.)

Vertikaalisen porakaivolämpöpumppujärjestelmän hyötyjä ovat vähäinen maapinta-alan tarve, sijainti maaperässä niin syvällä, etteivät lämpötilat juurikaan vaihtelee, sekä vähäinen putkipituuden ja pumppausenergian tarve. Haittapuolena ovat korkeammat kustannukset johtuen kalliista porauslaitteista. (Sarbu & Sebarchievici 2013.)

Pohjavesilämpöpumppusysteemi toimii kuvan 11 mukaisesti avoimella keruupiirillä, joka ottaa veden esimerkiksi kaivosta, kuljettaa sen lämmönsiirtimen läpi ja palauttaa jäähtyneen veden toiseen kaivoon tai läheiseen vesistöön. (Nam & Ooka 2010).

Pohjavesilämpö antaa ympäri vuoden hyvän tehon myös Suomessa, sillä pohjaveden lämpötila vaihtelee 4-12 °C välillä. Pohjavedellä on mahdollisuus myös ilmaisjäähdytykseen. (NIBE 2012.)



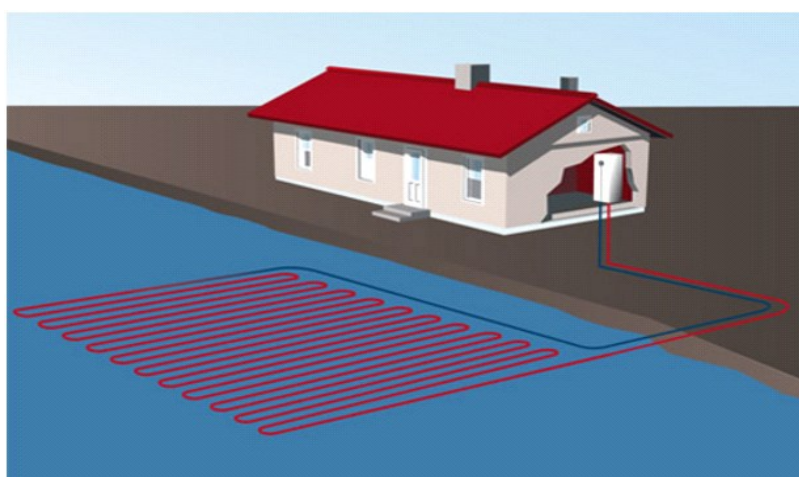
Kuva 11. Pohjavesilämpöpumppu (United States department of energy).

3.1.3 Vesistöön asennettava keruuputkisto

Maalämpöä voidaan hyödyntää myös vesistöön asennettavilla keruuputkistoilla alla olevan kuvan mukaisesti. Putkistojen asentaminen veteen on vesistöhanke, joka vesilain (587/2011) mukaan on toteutettava niin, että siitä ”ei aiheudu yleisten tai yksityisten etujen loukkausta”.

Keruuputkiston asentaminen vesistöön saattaa aiheuttaa hetkellisen veden sameutumisen etenkin matalassa rantavedessä, jossa putket upotetaan pohjan alapuolelle. Vesistöön asennetut keruuputkistot estävät ankkuroinnin ja voinee hankaloittaa kalastusta. Myöskään rantaa ei voi tällöin ruopata. (Juvonen & Lapinlampi 2013.)

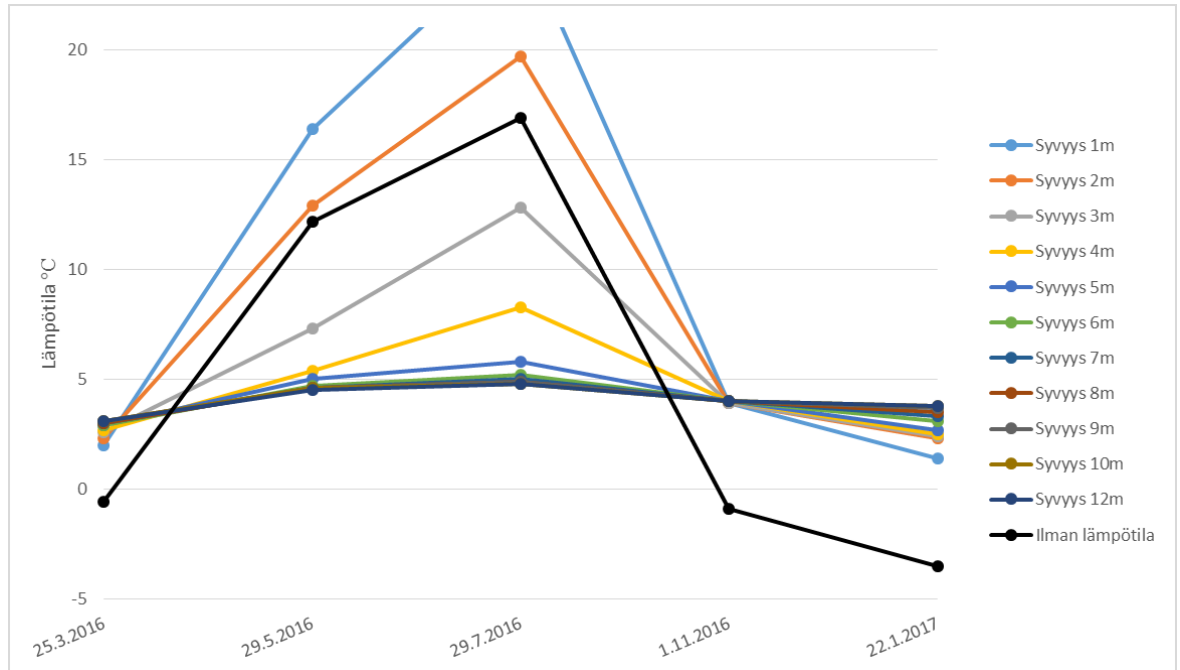
Putkistojen asentaminen vesistöön vaatii vesialueen omistajan suostumuksen sekä vähintään lähinaapureiden tai aluehallintoviraston luvan annon. (Juvonen & Lapinlampi 2013.) Alla olevassa kuvassa on esitetty vesistöön asennettava keruuputkisto.



Kuva 12. Vesistöön asennettava keruuputkisto (Lämpöeko Oy).

Luonnonvesi on yksi lupaavimpia uusia lämmönlähteitä. Luonnonvesiä ovat muun muassa sadevesi, pohjavesi, kaivovesi, sekä järvi- ja jokivedet. (Cho & Yun 2011.)

Päivittäinen luonnonveden keskilämpötila lämmityskautena on korkeampi kuin päivittäinen ilman keskilämpötila, jolloin vettä voidaan hyödyntää rakennuksen lämmittämiseen, ja viilennyskautena veden keskilämpötila on matalampi kuin ilman keskilämpötila, jolloin taas vettä voidaan hyödyntää rakennuksen jäähdytykseen. (Cho & Yun 2011.) Kuvas-
 ssa 13 on esitetty Hämeenkyrön Iso-Lehmijärven lämpötilat eri syvyyksissä eri vuodenaikoina sekä ilman lämpötila samoina ajankohtina.



Kuva 13. Hämeenkyrön Iso-Lehmijärven sekä ilman lämpötiloja (Hämeenkyrön Iso-Lehmijärven suojeluyhdistys ry, Ilmatieteen laitos a).

3.1.4 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Lämpöpumppu käsitteenä on tunnettu jo 1800-luvun alkupuolelta lähtien ja kaupallisia sovelluksia on ollut noin 60 vuotta. Lämpöpumput siirtävät lämpöenergiaa matalammasta lämpötilasta korkeampaan jääkaapin kaltaisesti. Yksi lämpöpumppujen houkutteleva ominaisuus on niiden kyky siirtää enemmän energiaa kuin mitä ne tarvitsevat toimiakseen. (Self et al. 2012.)

Maalämpöpumput käyttävät maata joko lämmönlähteenä tai lämpönieluna. Maapiiristä tuleva keruuliuos siirtää keräämänsä lämmön höyrystimessä pumpun kylmäainekierto. Kompressorissa kylmäaineen paine kasvaa ja samalla lämpö nousee jopa 100 °C:een. Paineistettu kylmäainehöyry kulkee lauhduttimeen, jossa se luovuttaa lämpöä lämmitysverkostossa kiertävälle vedelle. Tämän jälkeen jäähtynyt kylmäaine kulkee paineenalennusventtiilille, jonka jälkeen taas höyrystimelle ja aloittaa uuden kierron. Venttiilissä kylmäaineen lämpötila lasketaan noin -10 °C:een. (Sanner et al. 2003, Sarbu & Sebarchievici 2013, Bayer et al. 2011.)

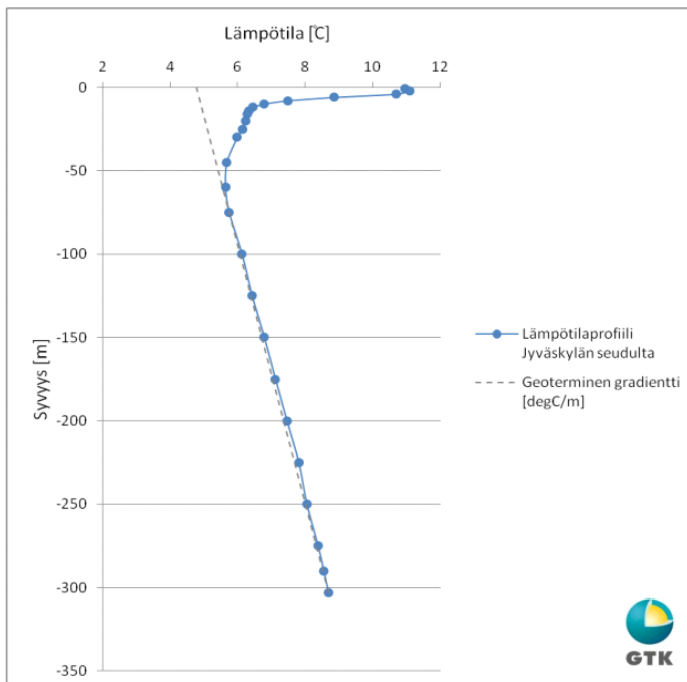
Monet järjestelmät sisältävät jäähdytyksen, jossa sisätilasta otetaan lämpöenergiaa ja se siirretään maahan. Jäähdytyksessä käänteinen venttiili kierrättää nestettä vastakkaiseen suuntaan. Lämmönsiirtimet ovat päinvastoin, maapiiriin yhteydessä oleva toimii lauhduttimena ja rakennukseen yhteydessä oleva höyrystimenä. (Self et al. 2012.)

Vaikka geotermisiä lämpöpumppuja on käytetty yli 50 vuotta, lämpöpumpputeknologian markkinaosuus on silti vielä lapsenkengissä fossiilisten polttoaineiden dominoivassa lämpöpömarkkinoita ja ilmalämpöpumppujen ollessa yleisin jäähdytysvaihtoehto. (Sanner et al. 2003.)

Keski- ja Pohjois-Euroopassa, jossa lämpöpumppumarkkinat ovat keskeisessä roolissa, ilmasto-olosuhteet vaativat suuren määrän lämmitystä ja vain osan vuodesta on tarve jäähdytykselle. Näin ollen, toisin kuin USA:ssa, Euroopassa lämpöpumput toimivat pääasiassa lämmitystilassa ympäri vuoden. (Sanner et al. 2003.)

Siinä missä ilmalämpöpumput käyttävät ympäröivää ilmaa lämmönlähteenä, maalämpöpumput hyödyntävät ympäröivää maata. Ympäröivän ilman lämpötilassa on suuria vaihteluja läpi vuoden ja päivittäin verrattuna maan lämpötilaan. Päivittäisellä tasolla maan lämpötila vaihtelee alle 0,8 metrin syvyydessä, syvemmillä maassa lämpötilavaihtelut pienenevät. Vaihtelu on suurempaa kausittaisella kuin päivittäisellä tasolla. (Self et al. 2012.)

Kuvassa 14 on esitetty Geologian tutkimuskeskuksen mittaama maaperän lämpötilaprofiili Jyväskylän seudulta. Syvyyden kasvaessa lämpötilan nousu tasoittuu.



Kuva 14. Maaperän lämpötilaprofiili Jyväskylän seudulla (GTK 2015).

3.1.5 Viilentäminen maalämpöpumpulla

Ilmalämpöpumpun tavoin rakennuksen viilentäminen onnistuu myös maalämpöpumpulla. Parhaiten tähän soveltuu porakaivoon sijoitettu keruuputkisto. Porakaivosta tuleva vesi on kesäisin maksimissaan 10 °C, mikä on riittävän alhainen jäähdytykseen. Lämmentynyt paluuvesi luovuttaa lämpönsä takaisin maahan talvea varten. Maalämpöpumpulla viilennettäessä ei tarvita erillistä sähköä kuluttavaa jäähdytyskonetta, vaan sähköä kuluu vain kiertovesipumppujen sekä mahdollisten puhaltimien toimintaan. (Motiva 2012, GTK 2008.)

Viilennystapoja maalämpöpumpulla on muutamia. Yleisin on johtaa keruupiirin neste ilmanvaihtoon kytkettyyn jäähdytyspatteriin ja näin viilentää huonetiloihin johdettavaa tuloilmaa. Toisena vaihtoehtona on jäähdyttää erillisessä lämmönvaihtimessa lattialämmitysverkoston lämmityspiirin vettä. Näillä tavoilla huoneilman lämpötilaa voidaan laskea parilla asteella. Viilennystä saadaan aikaan myös erillisellä vesikiertoisella jäähdytyspiirillä joko passiivi- tai puhallinkonvektorilla, jolloin huonelämpötilaa voidaan laskea jopa 8 asteella. (Motiva 2012.)

3.1.6 Maalämpöpumpun hyötysuhde

Maalämpöpumpun tuotettu lämpö suhteessa syötettyyn energiaan on COP, joka kertoo, kuinka tehokkaasti kulutettu sähköenergia saadaan muutettua lämpöenergiaksi. Tyypillisesti maalämpöpumpun hyötysuhde on 4:n luokkaa, mikä tarkoittaa, että lämpöpumppu tuottaa 4 yksikköä lämpöä jokaista syötettyä sähköenergiayksikköä kohden. Vertailuksi voidaan ottaa sähkölämmitin, jonka hyötysuhde on vain 1. (Blum et al. 2009, Sarbu & Sebarchievici 2013.)

COP riippuu maalämpöpiiriin tulevan veden lämpötilasta, joka taas riippuu geologisista olosuhteista, kuten maaperän lämpöominaisuuksista, hydraulisista ominaisuuksista ja ilmasto-olosuhteista, sekä teknisistä parametreista, kuten lämmönsiirtimen pituudesta ja tyypistä sekä eristyksen materiaalista ja laadusta. (Self et al. 2012, Sanner et al. 2003.) Muita tekijöitä, jotka vaikuttavat lämpöpumpun COP:n, ovat lämmitys- ja jäähdytyskuorma sekä rakennuksen tyyppi. Koska maaperän lämpötila on yli 10 metrissä lähes muuttumaton ympäri vuoden, riippuen toki vallitsevista sääolosuhteista ja ympäristön lämpötilasta, ja lämpötila nousee aavistuksen mitä syvemmälle maanpinnan alapuolelle mennään, porakaivoratkaisujen toimintakyky ja energiatehokkuus ovat paremmat kuin horisontaalisilla maalämpöratkaisuilla. (Sanner et al. 2003.)

Koska kompressorien ja pumppujen hyötysuhde ei ole 100 %, ne luovuttavat hukkalämpöä käymisen aikana. Kompressorien ja pumppujen hukkalämpöä voidaan hyödyntää esilämmittämällä kylmäaine lämpöpumppukierrossa. Esilämmitys kasvattaa komponenttien tehokkuutta kasvattaen koko maalämpöpumppusysteemin COP:a sekä vähentäen lämmönvaihtimen kuormitusvaatimuksia. (Self et al. 2012.)

3.1.7 Päästöt

Johtuen lämpöpumppujen yleisesti korkeasta hyötysuhteesta ja maahan varastoituneen auringon energian ja geotermisen energian hyödyntämisestä, maalämpöpumpuilla päästään matalampiin CO₂-päästöihin verrattuna muihin tavanomaisiin lämmitysmuotoihin, kuten öljylämmitykseen. Näin ollen maalämmön käyttö toimistorakennuksissa ja kotitalouksissa voi vähentää merkittävästi esimerkiksi hiilidioksidin- ja rikkidioksidipäästöjä. Eurooppalaisen tutkimuksen mukaan sähköllä toimivat lämpöpumput ehkäisevät lisääntyviä CO₂-päästöjä 45 %:lla verrattuna öljylämmittimeen ja 33 %:lla verrattuna kaasulämmittimeen. (Blum et al. 2009.)

Euroopan keskimääräiset sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt ovat 486 g CO₂/kWh ja ydinenergian aiheuttamat, ydinjätteiden loppusijoitus pois lukien, hiilidioksidipäästöt ovat 32 g CO₂/kWh. (Blum et al. 2009.)

Keskimääräiset CO₂-päästösäästöt yhtä asennettua maalämpöpumppua kohden vaihtelevat 1800-4000 kg vuodessa riippuen sähkön alkuperän kokonaisjakaumasta. Tästä vertauksena, vuonna 2006 Saksassa aiheutui 10 tonnin hiilidioksidipäästöt asukasta kohden. Vuonna 2005 arvioitiin keskimääräiseksi henkilöauton aiheuttamiksi CO₂-päästöiksi noin 161 g/km. Olettaen vuotuiseksi keskimääräiseksi ajomääräksi 15000 km yhdeltä kotitaloudelta, aiheutuvat CO₂-päästöt ovat 2400 kg luokkaa vuodessa, mikä on hieman enemmän kuin yhden maalämpöratkaisun tuomat CO₂-päästösäästöt vuodessa käyttäen Saksan sähkön alkuperän kokonaisjakaumaa. (Blum et al. 2009.)

Maalämpöpumput tuottavat puhdasta, tehokasta ja energiaa säästävää lämmitystä ja jäähdytystä vuoden ympäri. Maalämpöpumput käyttävät vähemmän energiaa kuin vaihtoehtoiset lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät auttaen samalla säästämään luonnonvaroja. Nämä ovat tärkeää teknologiaa vähentämään ympäristölle haitallisia kaasupäästöjä, kuten hiilidioksidipäästöjä (CO₂), rikkidioksidipäästöjä (SO₂) sekä typpioksidipäästöjä (NO_x).

Esimerkiksi vesivoimalla tai muulla uusiutuvalla energialla tuotetulla sähköllä käyvä lämpöpumppu vähentää päästöjä merkittävästi enemmän kuin jos sähkö olisi tuotettu kivihiihi-, öljy- tai maakaasuvoimalaitoksella. Taulukossa 3 on esitetty CO₂-päästöt eri primäärienergianlähteille. (Sarbu & Sebarchievici 2013.)

Taulukko 3. CO₂-päästöt eri primäärienergianlähteille (Sarbu & Sebarchievici 2013).

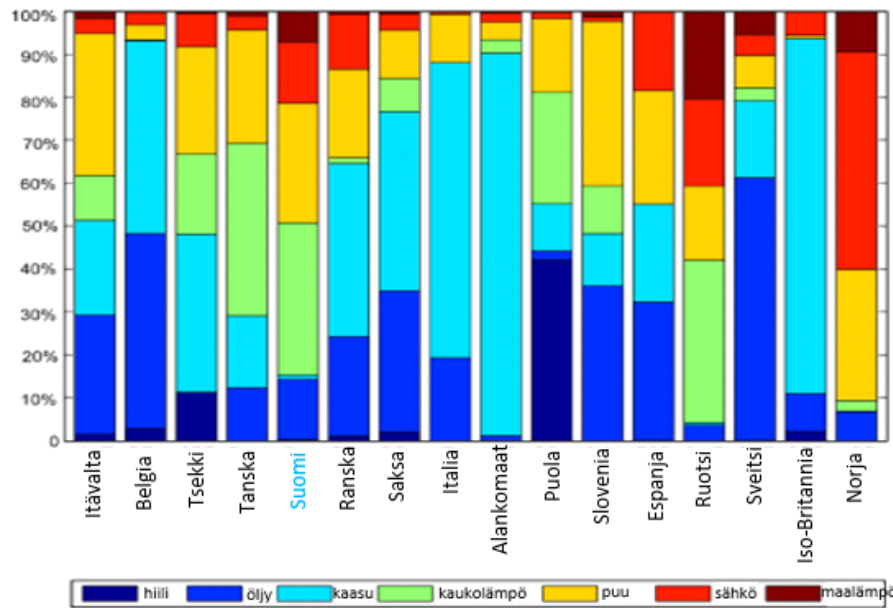
| Järjestelmä | Hyötysuhde | CO ₂ -päästöt (kg CO ₂ /kWh ^{polttoaine}) | CO ₂ -päästöt (kg CO ₂ /kWh ^{lampo}) |
|-----------------|------------|--|---|
| Hiili | 0,7 | 0,34 | 0,49 |
| Kaasuöljy | 0,8 | 0,28 | 0,35 |
| Nestekaasu | 0,8 | 0,25 | 0,31 |
| Maakaasu | 0,8 | 0,19 | 0,24 |
| Ilmalämpöpumppu | 2,5 | 0,47 | 0,19 |
| Maalämpöpumppu | 3,2 | 0,47 | 0,15 |

Maalämpöpumput eivät suoraan tuota CO₂-päästöjä, vaan päästöt ovat peräisin voimalaitoksista, jotka tuottavat pumppujen vaatiman sähkön. Kun sähköä tuotetaan korkeapäästöisissä voimalaitoksissa, vastaavasti maalämpöjärjestelmän päästöt ovat suuret. Raja, jolloin maalämpöjärjestelmät tulevat ekologisesti edullisiksi, liittyy lämpöpumpun vaatiman sähköntuoton CO₂-päästöihin, lämpöpumpun COP-arvoon sekä tavanomaisten lämmitysjärjestelmien hyötysuhteeseen. (Self et al. 2012.)

Koska kasvihuonekaasut edistävät ilmastonmuutosta, tämän etenemisen estämiseksi Eurooppa-neuvosto teki maaliskuussa 2007 lupauksen, että kasvihuonekaasupäästöjä vähennetään vuoteen 2020 mennessä vähintään 20 % verrattuna vuoden 1990 tasoon. (Euroopan komissio 2009.) Tämä tarkoittaa vuosittain 368 miljoonan tonnin CO₂-päästövähennyksiä. Uusi Eurooppa 2020 –strategia (Euroopan komissio 2009, European parliament 2010) esittää Euroopan unionin nykyisen etenemissuunnitelman talouden uudistumisesta, joka hyväksyttiin kesäkuussa 2010 ja korvasi Lissabonin strategian. (European parliament, 2000). Esityksen päätavoitteina on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 30 %, jos olosuhteet sen sallivat, nostaa uusiutuvan energian osuus 20 %:iin ja kasvattaa energiatehokkuutta.

Uusien maalämpöpumppujen asennus yksistään ei vähennä päästöjä, vaan ainoastaan säästää ympäristöä uusilta päästöiltä. Todellinen päästövähennys aiheutuu ainoastaan, kun samanaikaisesti saman kapasiteetin fossiilisia polttoaineita käyttävä järjestelmä otetaan pois käytöstä. Tästä esimerkkinä saneeraus tai kunnostus. (Bayer et al. 2011.)

Kuvassa 15 on esitetty lämmitysmuotojen jakautuminen asuinrakennuksille vuonna 2008 muutamissa Euroopan maissa. (Bayer et al. 2011.)



Kuva 15. Lämmitysmuotojen jakautuminen asuinrakennuksille vuonna 2008 (Bayer et al. 2011).

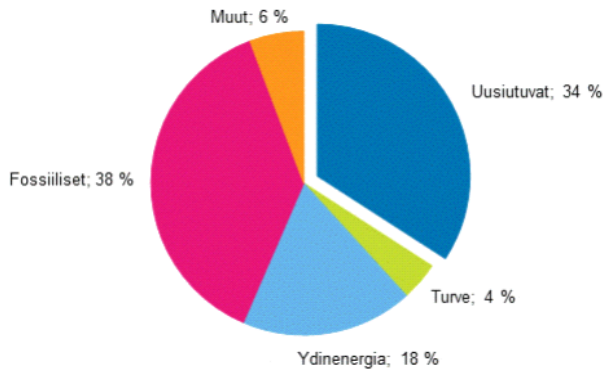
3.1.8 Maalämpö Suomessa

Uusiutuvaa energiaa pyritään lisäämään jatkuvasti energia- ja ilmastostrategian sekä Suomen kansallisen uusiutuvan energian toimintasuunnitelman tavoitteiden mukaisesti. Suomen tavoitteena on uusiutuvan energian kasvu 9,5 % vuoden 2005 tasosta vuoteen 2020 mennessä, jolloin saavutettaisiin 38 % osuus Suomen energiankulutuksesta. (Motiva 2017a.)

Suomi kuuluu uusiutuvan energian käytössä EU-maiden kärkijoukkoihin yhdessä Ruotsin, Latvian ja Itävallan kanssa. Suomen painopiste uusiutuvassa energiassa on puussa ja bioperäisissä kierrätyspolttoaineissa. (Motiva 2017a.)

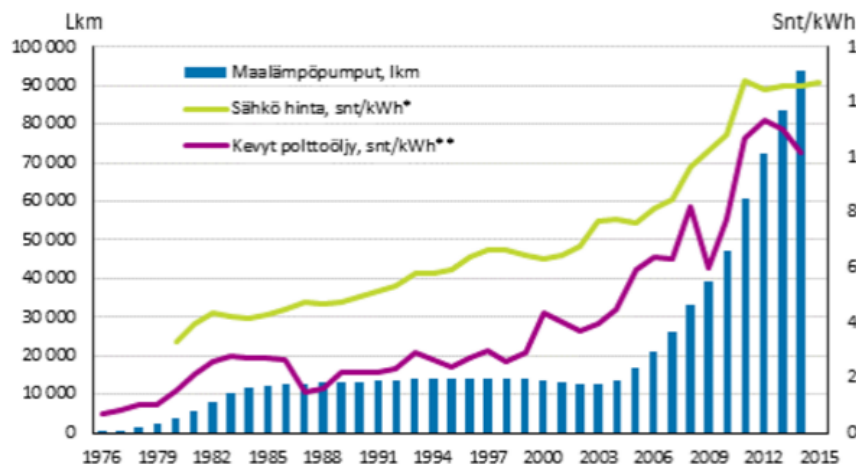
Vuonna 2016 Suomen energiankulutus oli 1335 PJ, josta uusiutuvan energian osuus oli alla olevan kuvan mukaisesti 34 % eli noin 454 PJ. (Motiva 2017a.)

Liitekuvio 13. Uusiutuvan energian osuus kokonaisenergiasta 2016*



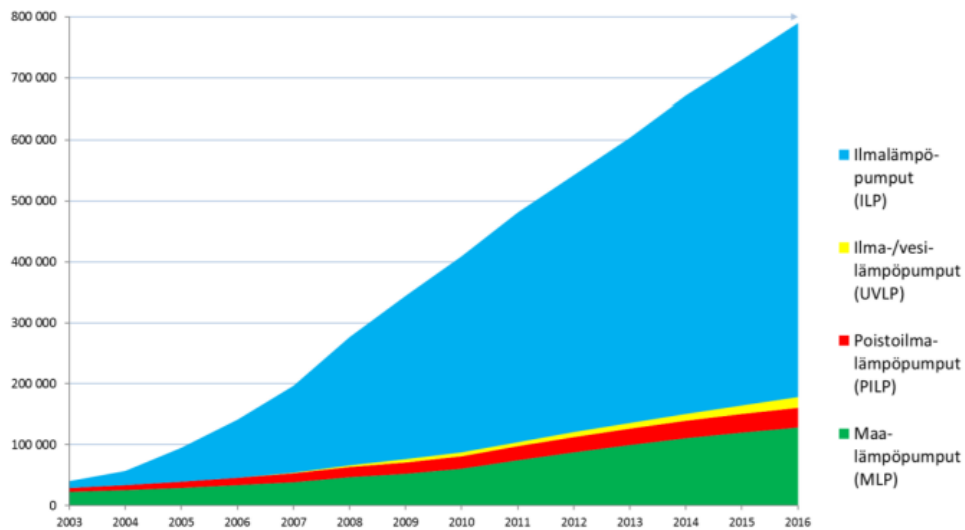
Kuva 16. Uusiutuvan energian osuus kokonaisenergiankulutuksesta vuonna 2016 (Motiva 2017a).

Maalämpöpumppuja on käytetty Suomessa 1970-luvun puolesta välistä lähtien ja niiden suosio kasvoikin 1970-luvun energiakriisin seurauksena. 1980-luvun puolivälissä maalämpöala ajautui kriisiin ja maalämpöpumppujen myynti käytännössä lakkasi 10 vuoden ajaksi. 1990-luvun lopulla maalämmön suosio alkoi kuitenkin nousta jälleen (kuva 17). (Juvonen & Lapinlampi 2013.)



Kuva 17. Maalämpöpumppujen lukumäärän kehitys 1976-2015 (SULPU ry).

Vuoteen 2016 mennessä asennettujen maalämpöpumppujen määrä Suomessa oli noin 126000 kpl kuvan 18 mukaisesti (SULPU ry).



Kuva 18. Asennettujen lämpöpumppujen määrä Suomessa vuoteen 2016 mennessä (SULPU ry).

3.2 Kaukolämpö

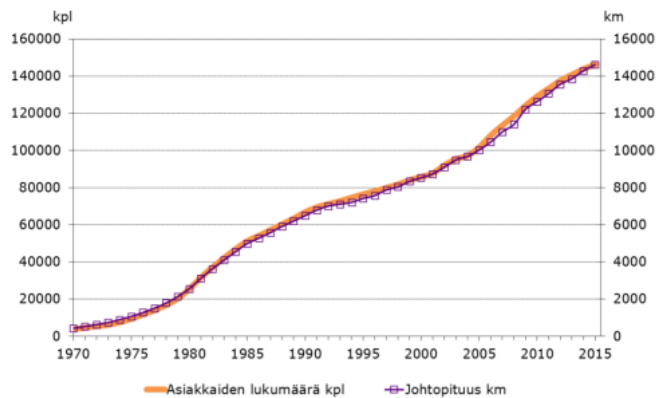
Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmitysmuoto, ja sitä on hyödynnetty Suomessa 1950-luvulta lähtien. Kaukolämpö tuotetaan useimmiten polttolaitoksissa joko lämmön ja sähkön yhteistuotantona (CHP) tai pelkästään lämpönä. Polttoaineina laitoksissa käytetään paikkakunnasta riippuen puuta tai muuta biomassaa, kivihiiltä, maakaasua, turvetta, jätettä tai öljyä. Koska pyritään koko ajan enenevässä määrin kohti hiilineutraalisuutta, fossiilisten polttoaineiden osuus pienenee. Myös erilaiset lämpöpumput sekä hybridiratkaisut yleistyvät kaukolämmön tuotannossa. Kaukolämmön asiakkaita ovat niin asuinrakennukset, liike- ja julkiset rakennukset kuin teollisuuskin. (Energiateollisuus b.)

Kaukolämpöä siirretään asiakkaille kuumana vetenä kaksiputkisessa (meno- ja paluuputki) kaukolämpöverkostossa. Rakennukseen tulevassa menoputkessa kiertävä lämmin kaukolämpövesi luovuttaa asiakkaalle lämpöä lämmönsiirtimen avulla, jonka jälkeen jäähtynyt vesi palaa paluuputkessa takaisin tuotantolaitokselle uudelleen lämmitettäväksi. Kaukolämpövesi itsessään ei kierrä rakennusten lämmitysverkostossa. Kaukolämpöverkoston menoputken lämpötila vaihtelee sään mukaan 65-115 °C:n välillä ja paluuputken lämpötila on useimmiten 40-60 °C:n välillä. Rakennusten käyttöveden lämpötilan tulee olla yli 55 °C, jotta mahdolliset legionellabakteerit saadaan hävitettyä. (Energiateollisuus d.)

Kaukolämpöverkostoissa kiertävä vesi on käsitelty mekaanisten epäpuhtauksien ja hapen poistamiseksi sekä putken sisäpuolisen korroosion estämiseksi, minkä lisäksi vesi on usein myös värjätty mahdollisten putkivuotojen paikallistamisen helpottamiseksi. Kaukolämpöveden vihertäväksi muuttava väriaine ei kuitenkaan ole ympäristölle eikä terveydelle haitallista. (Energiateollisuus d.)

Kaukolämpöverkoston johdot asennetaan useimmiten noin 0,5-1 metrin syvyyteen maahan joko katujen, jalkakäytävien tai kevyen liikenteen väylien alle, joissain tapauksissa myös puistomaahan tai isompien johtojen tapauksessa tunneleihin. Vuoden 2015 lopussa kaukolämpöverkoston kokonaispituus Suomessa oli kuvan 19 mukaisesti noin 14600 km, ja arvioitu vuosittainen verkon pituuden kasvu on 250-500 km. (Energiateollisuus d.)

Asiakkaiden lukumäärä ja johtopituus



Kuva 19. Kaukolämmön asiakkaiden lukumäärän sekä kaukolämpöverkoston johtopituuden kasvu 1970-2015 (Energiateollisuus d.).

Kaukolämpöjohdot muodostuvat teräksisestä virtausputkesta, jota ympäröi uretaanieristys ja muovinen suojaputki. Meno- ja paluuputket voivat olla joko saman tai erillisten suojaputkien sisällä oheisten kuvien mukaisesti. (Energiateollisuus d.)



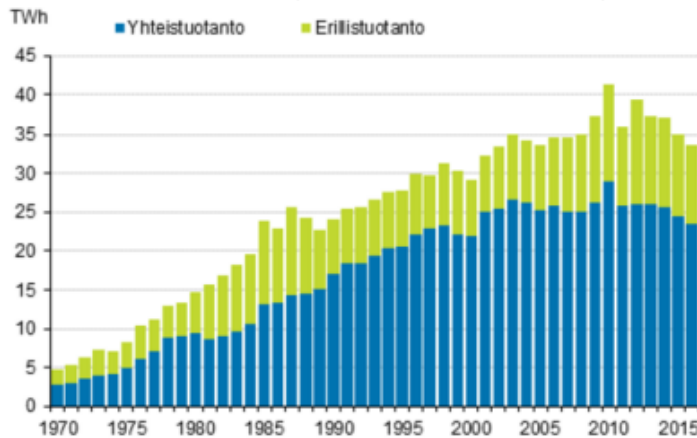
Kuva 20. Kaukolämpöjohto, meno- ja paluuputki saman suojaputken sisällä (Energiateollisuus d.).



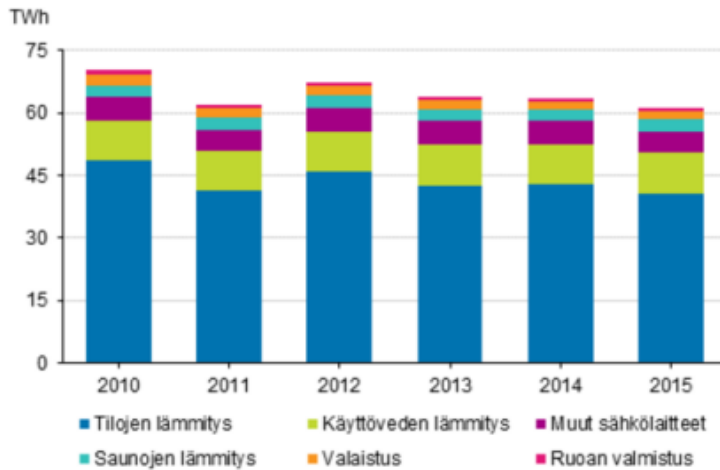
Kuva 21. Kaukolämpöjohto, meno- ja paluuputki eri suojaputkien sisällä (Energiateollisuus d.).

3.2.1 Kaukolämmön tuotanto

Kuvassa 22 on esitetty kaukolämmön kokonaistuotannon kehitys Suomessa vuosina 1970-2016. Kaukolämmön kokonaistuotanto on kääntynyt pieneen laskuun viimeisen viiden vuoden aikana. (Tilastokeskus 2017a.) Syinä tähän on muun muassa tilojen lämmitysenergian lasku (kuva 23) lämpimistä säistä johtuen, muiden lämmitysmuotojen kasvu suhteessa kaukolämpöön (mm. lämpöpumput) sekä rakennusten lämmöntarpeen väheneminen johtuen paremmista lämmöneristyksistä sekä ilmanvaihdon paremmasta lämmöntalteenotosta. (Tilastokeskus 2016a.)

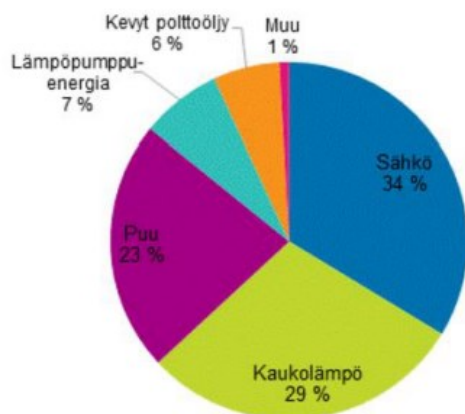


Kuva 22. Kaukolämmön kokonaistuotannon kehitys 1970-2016 (Tilastokeskus 2017a).



Kuva 23. Asumisen energiankulutus 2010-2015 (Tilastokeskus 2016a).

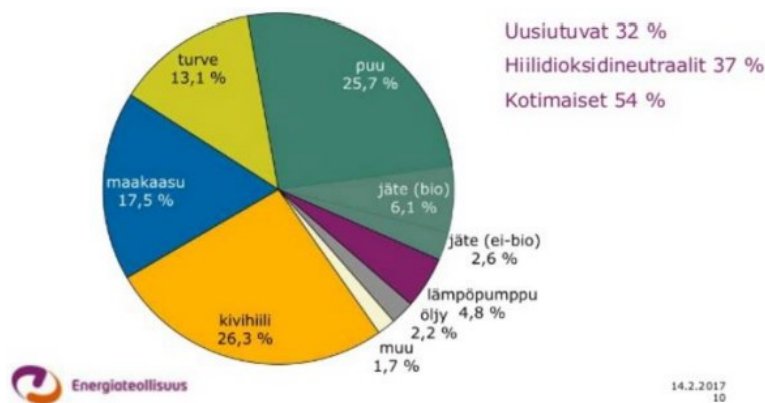
Kuvassa 24 on esitetty asumisen energiankulutus energialähteittäin Suomessa vuonna 2015. Kokonaisuudessaan asumiseen kului energiaa 61 TWh vuonna 2015. Suurin osa energiankulutuksesta aiheutui sähköstä, jota kulutettiin lähes 21 TWh (34 %). Kaukolämpöä kulutettiin 18 TWh (29 %), puuta 14 TWh (23 %), lämpöpumppuenergiaa 4 TWh (7 %) ja kevyt polttoöljy, maa- ja nestekaasu, turve, raskas polttoöljy ja hiili kattoivat yhteensä 4 TWh (7 %) asumisen energiankulutuksesta. (Tilastokeskus 2016b.)



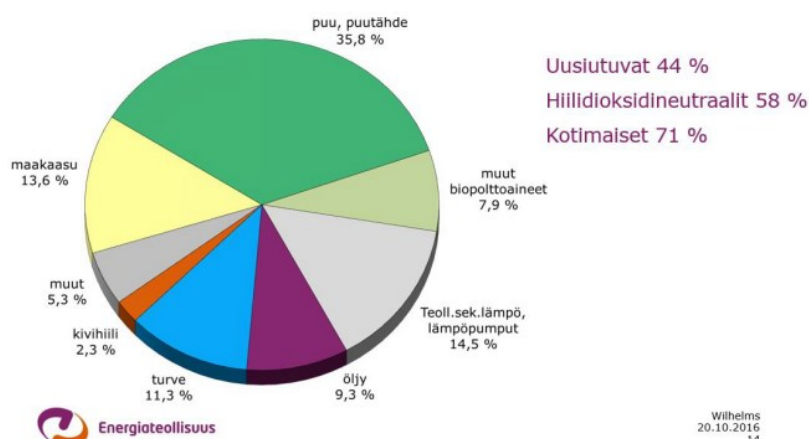
Kuva 24. Asumisen energiankulutus energialähteittäin vuonna 2015 (Tilastokeskus 2016b).

3.2.2 Kaukolämmön polttoaineet ja päästöt

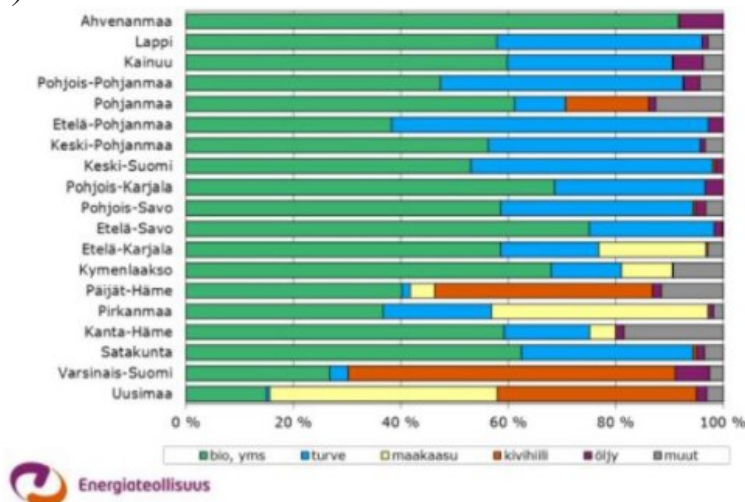
Kaukolämpöä tuotetaan sekä sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa että lämpökeskuksissa pelkästään lämpönä. Kaukolämpöä tuotettiin Suomessa 36,6 TWh vuonna 2016, josta 25,6 TWh tuotettiin lämmön ja sähkön yhteistuotantona ja 11 TWh lämmön erillistuotantona. Kuvassa 25 on esitetty kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotantoon käytetyt polttoaineet vuonna 2016 sekä kuvassa 26 kaukolämmön erillistuotantoon käytetyt polttoaineet vuonna 2015. Kuvassa 27 on kaukolämmön ja yhteistuotantosähkön polttoainejakauma maakunnittain vuonna 2015. (Energiateollisuus c.)



Kuva 25. Kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotantoon käytetyt polttoaineet 2016 (Energiateollisuus c.).

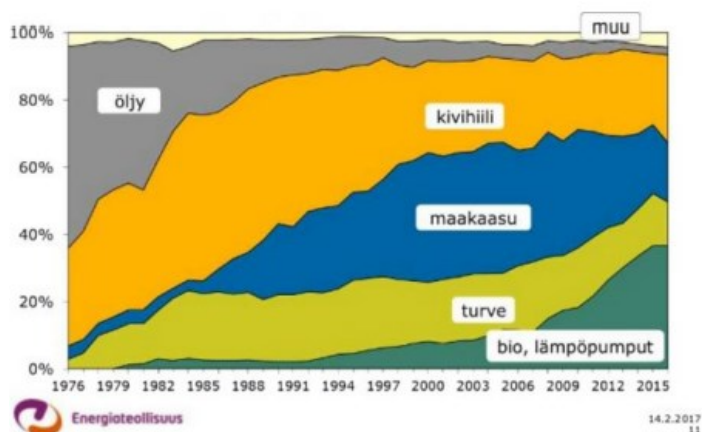


Kuva 26. Kaukolämmön erillistuotantoon käytetyt polttoaineet 2015 (Energiateollisuus c).

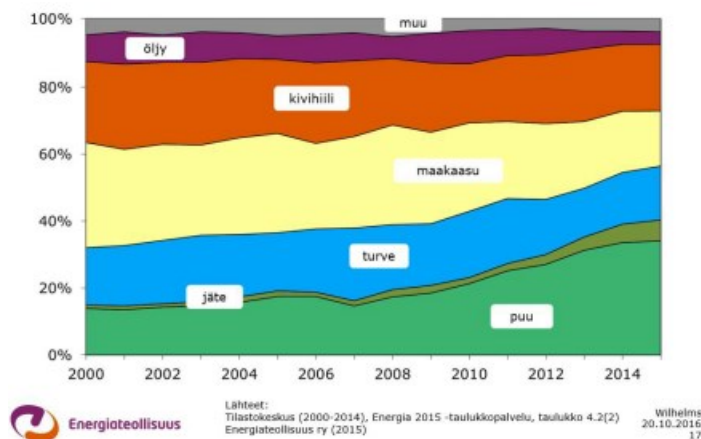


Kuva 27. Kaukolämmön ja yhteistuotantosähkön polttoaineet maakunnittain vuonna 2015 (Energiateollisuus c).

Kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotannossa sekä pelkän kaukolämmön tuotannossa on alla olevien kuvien mukaisesti tapahtunut suuri lasku öljyn, kivihillen ja maakaasun käytössä, ja biopohjaiset sekä muut uusiutuvat energialähteet ovat kasvattaneet suosiota. (Energiateollisuus c.)

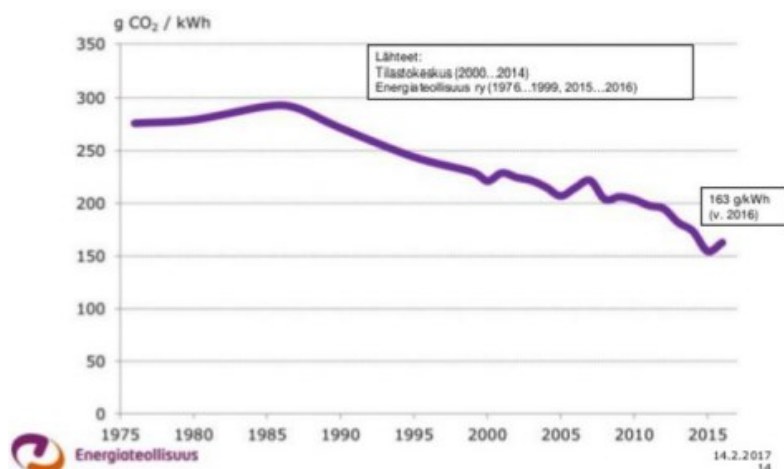


Kuva 28. Kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotantoon käytetyt polttoaineet 1976-2015 (Energiateollisuus c).



Kuva 29. Kaukolämmön tuotantoon käytetyt polttoaineet (Energiateollisuus c).

Koska jatkuvasti pyritään kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa, tulee kivihiilen käyttö kaukolämmön tuotannossa pienenevään huomattavasti. Kivihiili tullaan korvaamaan yhä enenevässä määrin lisäämällä biopohjaisia polttoaineita, jonka lisäksi maalämpö, jätelämpöjen hyödyntäminen sekä mahdollisesti aurinkolämpö tulee saamaan jalansijaa kaukolämmön tuotannossa. Kivihiilen käytön vähentäminen näkyy myös selkeästi kaukolämpötuotannon hiilidioksidipäästöjen vähenemisenä (kuva 30), vaikkakin vuonna 2016 pienoinen päästönousu aiheutuikin. Hiilidioksidipäästöt ovat lähes puolittuneet 1980-luvun puolivälistä, jolloin päästöt olivat korkeimmillaan. (Energiateollisuus c.)



Kuva 30. Kaukolämmön tuotannon hiilidioksidipäästöt (Energiateollisuus c).

3.2.3 4. sukupolven kaukolämmitys

Neljännän sukupolven kaukolämpö (4GDH) sisältää lähes kaikkea kaukolämpöön liittyvää kansainvälistä tutkimusta. Tutkimukset pyrkivät vastaamaan ilmastonmuutoksen, teknologian kehittymisen ja resurssitehokkuuden asettamiin haasteisiin. Tavoitteena olisi kehittää kaukolämpöä ja -jäähdytystä osana tulevaisuuden kestäviä energiaratkaisuja. Alla olevassa kuvassa on esitetty neljännän sukupolven kaukolämmön tutkimusalueet. (Lund et al. 2014.)



Kuva 31. Neljännen sukupolven kaukolämmön tutkimusalueet (Lund et al. 2014).

Tuoreet tutkimukset ovat selvittäneet kaukolämmön soveltuvuutta osana kestäviä energiajärjestelmiä perustuen uusiutuvaan energiaan sekä merkittäviin vähennyksiin tilojen lämmitystarpeessa. Tutkimuksissa päätellään, että kaukolämmön rooli on merkittävä, mutta kaukolämpöteknologioita täytyy edelleen kehittää verkostohäviöiden vähentämiseksi, yhteisvaikutuksen hyödyntämiseksi ja siten kasvattaa järjestelmän alhaisen lämpötilan tuotantolaitosten hyötysuhteita. (Lund et al. 2014.)

Pystyäkseen toteuttaa tehtävänsä tulevaisuuden kestävässä energiajärjestelmässä kaukolämmön täytyy kohdata seuraavat haasteet:

1. Matalalämpöisen kaukolämmön toimittaminen tilojen sekä lämpimän käyttöveden lämmitykseen niin olemassa oleviin rakennuksiin, energiaremontoitaviin olemassa oleviin rakennuksiin kuin uusiin matalaenergiataloihin.
2. Lämmön jakaminen verkostossa pienin häviöin.
3. Lämmön kierrättäminen matalalämpötilaisista lämmönlähteistä ja integroiduista uusiutuvista lämmönlähteistä, kuten aurinko- ja maalämpö.
4. Integroituna osana älykästä energiajärjestelmää oleminen, mukaan lukien integroituna osana 4. sukupolven kaukojäähdytysjärjestelmää.
5. Sopivien suunnitelma-, kustannus- ja kannusterakenteiden varmistaminen operaatioon nähden, kuten myös strategiaan sijoituksiin, suhteessa muutokseen tulevaisuudessa kestävässä energiajärjestelmässä.

(Lund et al. 2014.)

Kaukolämpöinfrastruktuurit ovat tärkeässä roolissa energiatehokkuuden kasvattamisessa ja täten saamaan niukat resurssit vastaamaan tulevaisuuden vaatimuksia. Kaukolämpö muodostuu putkistosta, joka on yhteydessä naapurustojen rakennuksiin, keskukseen tai koko kaupunkiin niin, että niitä voi palvella keskitetyiltä laitoksilta tai monilta lämmönlähteyksiköiltä. Tämä lähestymistapa antaa mahdollisuuden käyttää mitä tahansa lämmönlähdettä. Kaukolämmön sisällyttäminen tulevaisuuden kestäviin kaupunkeihin antaa mahdollisuuden laajaan lämmön ja sähkön yhteistuotannon käyttöön yhdessä energiajärjestelmän hyötykäytön ja erilaisten teollisuuden ylijäämälämmön, kuten myös maalämmön ja aurinkolämmön, kanssa. (Lund et al. 2014.)

Ensimmäisen sukupolven kaukolämpöjärjestelmät käyttivät höyryä lämmönsiirtoaineena. Nämä järjestelmät esitettiin ensimmäistä kertaa USA:ssa 1880-luvulla. Lähes kaikki kaukolämpöjärjestelmät käyttivät tätä teknologiaa USA:ssa ja Euroopassa vuoteen 1930 asti. Tämän järjestelmän tavanomaisia komponentteja olivat betonikanavissa olevat höyryputket, lauhteenpoistin ja kompensattori. Tänä päivänä höyryä hyödyntävää järjestelmää pidetään vanhentuneena teknologiana, koska korkeat höyryn lämpötilat saavat aikaan huomattavia lämpöhäviöitä ja höyryräjähdyksistä aiheutuneet vakavat onnettomuudet jopa tappoivat ihmisiä. Lisäksi lauhdepaluuputket syöpyivät usein pienentäen pa-luulauhdetta ja madaltaen energiatehokkuutta. (Lund et al. 2014.)

Toisen sukupolven järjestelmät käyttivät paineistettua kuumaa vettä lämmönsiirtoaineena menolämpötilan ollessa pääasiassa yli 100 °C. Nämä järjestelmät nousivat esiin 1930-luvulla ja dominoivat kaikkia uusia järjestelmiä 1970-luvulle asti. (Lund et al. 2014.)

Kolmannen sukupolven järjestelmät esiteltiin 1970-luvulla ja ne kattoivat merkittävän osan kaikista laajennuksista 1980-luvulla ja sen jälkeen. Paineistettua vettä käytetään yhä lämmönsiirtoaineena, mutta menolämpötila on usein alle 100 °C. Kolmatta sukupolvea kutsutaan joskus ”Skandinavian kaukolämpöteknologiaksi”, koska monet kaukolämpökomponenttien valmistajista ovat skandinaavisia. (Lund et al. 2014.)

Trendi näiden kolmen sukupolven läpi on ollut kohti alhaisempia jakelulämpötiloja, vähämateriaalisia komponentteja ja esivalmistelua, joka vähentää työvoimavaatimusta rakennustyömailla. Seuratessa näitä määräyksiä tulevaisuuden kaukolämpöteknologian neljännen sukupolven tulisi muodostua matalammista jakelulämpötiloista, kokoonpanopainotteisista komponenteista sekä joustavammista putkimateriaaleista. (Lund et al. 2014.)

Samanlaisia teknologiasukupolvien voidaan määritellä kaukojäähdytysjärjestelmistä. Ensimmäinen sukupolvi oli putkijäähdytysjärjestelmä, joka esitettiin 1800-luvun lopussa. Ne muodostuivat keskitetyistä kondensaattoreista ja hajautetuista höyrystimistä, joissa oli jäähdytysaine jakelunesteinä. Toisen sukupolven kaukojäähdytysjärjestelmät, jotka perustuivat suuriin mekaanisiin jäähdyttimiin ja kylmään veteen jakelunesteinä, ilmestyivät 1960-luvulla. Kolmas teknologiasukupolvi muodostaa monipuolisemman kylmäsaannin perustuen absorptiojäähdyttimiin, mekaanisiin jäähdyttimiin lämmöntalteenoton kanssa tai ilman, järvistä saatavaan jäähdytykseen, ylimääräiseen kylmävirtaukseen ja kylmävarastoihin. Jakelunesteinä on yhä kylmä vesi. Monet näistä kolmannen sukupolven asennuksista vakiinnutettiin 1990-luvulla, kun CFC-yhdisteet kiellettiin Montrealin pöytäkirjan mukaisesti. Tulevaisuuden neljännen sukupolven kaukojäähdytysjärjestelmät voidaan määritellä uusiksi älykkäiksi kaukojäähdytysjärjestelmiksi, jotka ovat enemmän vuorovaikutuksessa kaikkien energiaverkkojen (lämpö, sähkö ja jäähdytys) kanssa. (Lund et al. 2014.)

Useimmissa maissa rakennukset muodostavat huomattavan osan energiankulutuksesta. Siksi kestävä rakentamisen kehitys on tärkeässä roolissa kansallisten energiajärjestelmien muutoksessa kohti tulevaisuuden kestävää energiantuotantoa, jolla pyritään vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä sekä CO₂-päästöjä. 4. sukupolven kaukolämpö- ja kaukojäähdytysteknologia edellyttää rakennusten suorituskyvyn ja kaukolämpöjärjestelmän koordinoimista koko systeemin energiatehokkuuden parantamiseksi. (Lund et al. 2014.)

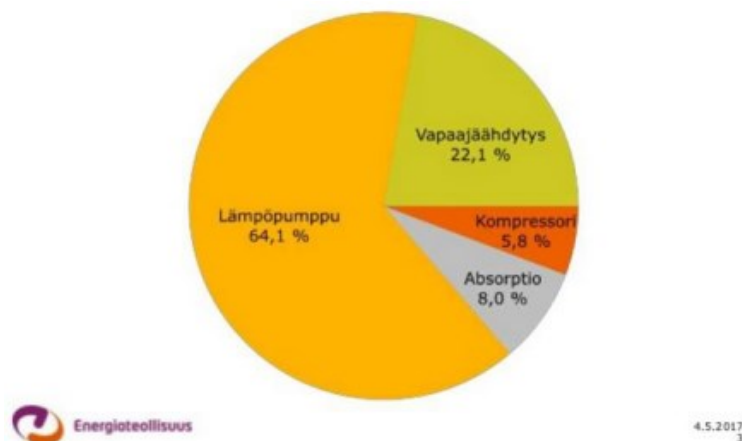
Kaukolämpöjärjestelmän, joka perustuu vain uusiutuvasta energiasta tuotettuun lämpöön kustannustehokkaasti, vision ymmärtämiseksi tulee tutkia useita vaihtoehtoja kiinnittäen erityishuomiota matalien meno- ja paluulämpötilojen jakeluhyötyihin. Lisäetuja ovat kuumien vesivuotojen vähentynyt riski, teräsputkien pienempi lämpölaajeneminen, jakeluputkien kiehumisen pienempi riski ja mahdollisuus käyttää teräksen lisäksi muitakin putkimateriaaleja. (Lund et al. 2014.)

Matalalämpöisellä kaukolämpöverkostolla, jossa meno- ja paluuviesien lämpötilat ovat noin 50/20 °C, on suuri potentiaali hyödyntää hukkalämpöä teollisuusprosesseista ja lii-kerakennuksien jäähdyttämisestä. Vaikka hukkalämpöä olisi saatavilla vuoden ympäri, lämmönsaanti ei ole kontrolloitua. Tästä johtuen kaukolämpöjärjestelmä, joka hyödyntää lii-kerakennusten prosesseista paikallista hukkalämpöä, on paljon monimutkaisempi kau-ko-lämpöjärjestelmä, joka vaatii yksityiskohtaisen dynaamisen toimintakykyselvityksen sekä suunnitelman. (Lund et al. 2014.)

Aurinkolämpöjärjestelmiä voidaan käyttää täydentämään lämmöntarjontaa kaukoläm-pöjärjestelmässä. Maanpäällisiä isoja aurinkolämpölaitoksia voidaan asentaa aavistuksen kaupungin ulkopuolisille alueille ja ne voidaan kytkeä kaukolämpöjärjestelmän pääjake-lulinjoihin. Johtuen auringon saatavuuden kausittaisesta yhteensopimattomuudesta ja lämmön hyödyntämisestä rakennuksissa tilojen lämmitykseen, kausivarasto voi olla tar-peen perustaa aurinkolämmön kaukolämpöjärjestelmälle toimitettavan osuuden nostami-seksi. Iso pitkäaikaisvarasto voi olla myös hyödyllinen muiden lämmönlähteiden yh-distämiseksi verkkoon. Pienempiä paikallisia, lyhytaikaisella varastolla varustettuja, au-rinkolämpöjärjestelmiä voidaan käyttää ylläpitämään tarvittavaa lämpötilaa verkon ulko-osilla. (Lund et al. 2014.)

3.2.4 Kaukojäähdytys

Kaukojäähdytys on keskitetysti tuotettua jäähdytettyä vettä, jota jaetaan putkiston väli-tyksellä kiinteistöille. Kaukojäähdytys on kaukolämmön toimintaperiaatteeseen verratta-vissa oleva prosessi, jossa kaukolämmöstä eroten siirretäänkin asiakkaalta lämpöä pois. Enimmäkseen kaukojäähdytystä tuotetaan lämpöpumpuilla, mutta sen lisäksi myös ab-sorptiolla ja kompressoreilla (kuva 32). (Energiateollisuus a.)



Kuva 32. Jäähdytysenergian tuotanto Suomessa vuonna 2016 (Energiateollisuus a.).

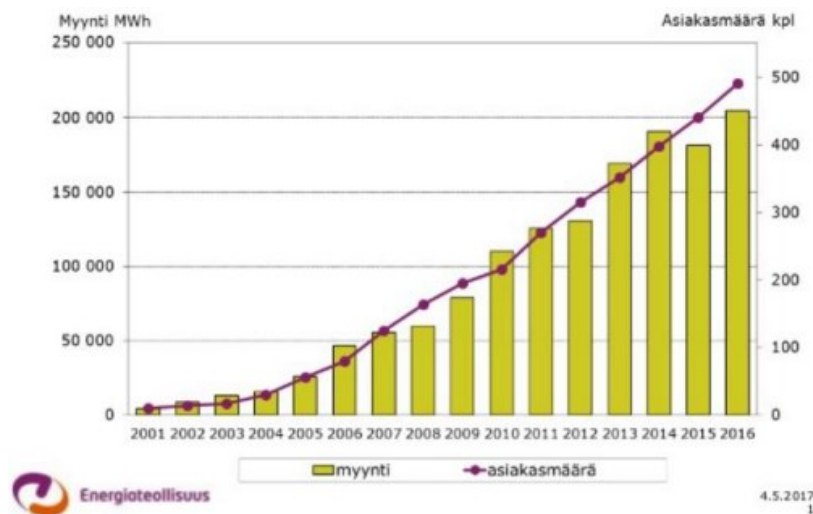
Kaukojäähdytys on ympäristöystävällinen, luotettava ja vaivaton jäähdytysmenetelmä, ja se pienentää kiinteistön sähkönkulutusta merkittävästi. (Tampereen sähkölaitos a.)

Kaukojäähdytyksen hyötyjä asiakkaille ovat

- pienipäästöisyys
- vältetään jäähdytyskoneiden aiheuttamat ääni- sekä värinähaitat
- tilaa säästyy jäähdytyskoneilta
- ei lauhdutusyksikköjen julkisivuhaittoja
- säästytään jäähdytyskoneiden huolto- ja kunnossapitotöistä
- helppo ja toimintavarma menetelmä.

(Tampereen sähkölaitos a.)

Kuvassa 33 on esitetty kaukojäähdytysenergian myynnin ja kaukojäähdytysasiakkaiden määrän kehitys Suomessa. Vuonna 2016 kaukojäähdytysenergian myynti oli noin 205 GWh ja asiakkaiden määrä oli lähes 500. (Energiateollisuus a.)



Kuva 33. Kaukojäähdytysenergian myynnin ja asiakasmäärän kehitys (Energiateollisuus a.).

Euroopan (EU27) jäähdytysmarkkinoiden koko on noin 330 TWh, ja sen arvellaan nousevan jopa 500 TWh vuoteen 2030 mennessä. Kaukojäähdytyksen osuus Euroopan jäähdytysmarkkinoista on noin prosentti, 3 TWh. Eniten kaukojäähdytystä Euroopan maista tuotetaan Ranskassa (0,9 TWh), Ruotsissa (0,9 TWh), Saksassa (0,3 TWh), Suomessa (0,2 TWh) sekä Norjassa (0,15 TWh). (Laitinen 2016.)

Tulevaisuudessa kaukojäähdytysjärjestelmät tulevat todennäköisesti hyödyntämään monenlaisia tuotantoteknologioita, kuten kompressiokäyttöisiä lämpöpumppuja ja vapaajäähdytysmahdollisuuksia (energiakaivokentät, pohjavesi, vesistöt). Myös jäähdytysverkon keräämän lämpöenergian kierrättäminen lämpöpumpuilla kaukolämmitykseen tulee yleistymään. (Laitinen 2016.)

3.2.5 Kaukolämpö ja –jäähdytys Tampereella

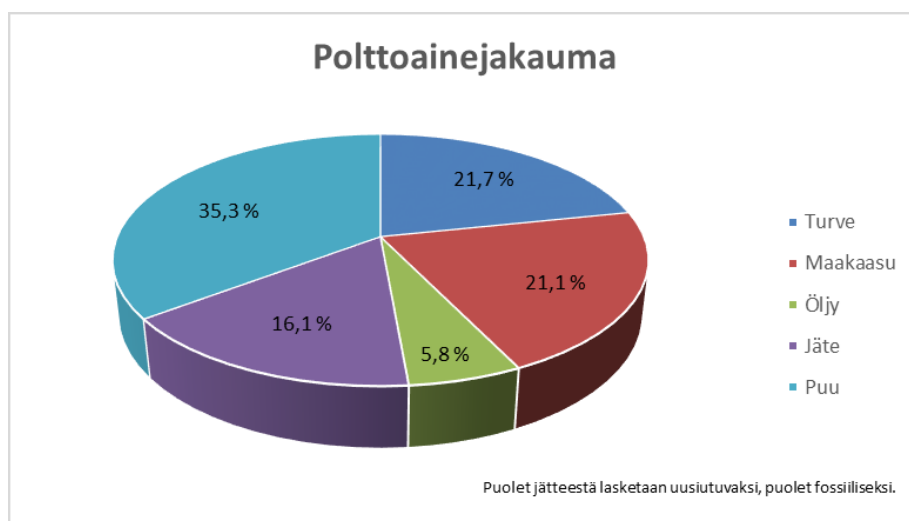
Tampereen paikallinen energiayhtiö on Tampereen Sähkölaitos Oy. Tamperelaista kaukolämpöä on tuotettu jo vuodesta 1964, ja tällä hetkellä kaukolämmön jakeluverkosto kattaa Tampereen, Pirkkalan ja Ylöjärven taajamat. Kaukolämpöverkoston kokonaispituus on noin 600 kilometriä. Kaukolämmitettyjen kiinteistöjen määrä jakeluverkon alueella on 5500 ja alueen asukkaista noin 200 000 asuu kaukolämmitetyssä kodissa. (Tampereen Sähkölaitos a.) Vuonna 2016 Tampereen Sähkölaitoksen kaukolämmön tuotanto oli yhteensä 2251 GWh. Alla olevassa taulukossa on esitetty eri voimalaitoksien tuotantoosuudet. (Tampereen Sähkölaitos 2017a.)

Taulukko 4. Tampereen kaukolämmöntuotanto 2016 (Tampereen Sähkölaitos 2017a)..

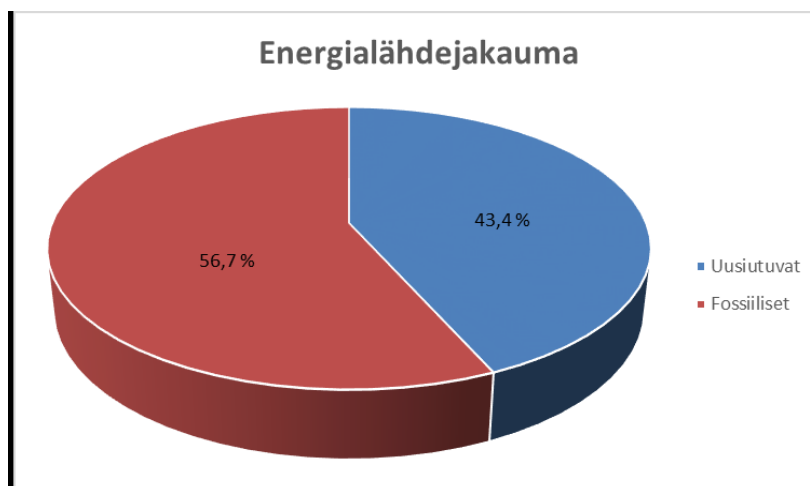
| Voimalaitokset | Lämpö (GWh) | % |
|---------------------|---------------|-------------|
| Lielahi | 362,4 | 16,1 |
| Naistenlahti 1 | 2,3 | 0,1 |
| Naistenlahti 2 | 855,4 | 38 |
| Tammervoima | 362,4 | 16,1 |
| CHP-tuotanto | 1582,5 | 70,3 |
| Lämpökeskukset | 668,5 | 29,7 |
| Yhteensä | 2251 | 100 |

Siirryttäessä yhä enenevässä määrin pois fossiilisista polttoaineista kohti uusiutuvaa energiaa, on Tampereen Sähkölaitos Oy investoinut uusiin laitoksiin ja saneerannut vanhoja. Uusia investointeja ovat Sarakulman pellettilämpökeskus, Hervannan hakelämpökeskus sekä Tammervoiman jätettä polttava hyötyvoimalaitos. (Tampereen Sähkölaitos b.)

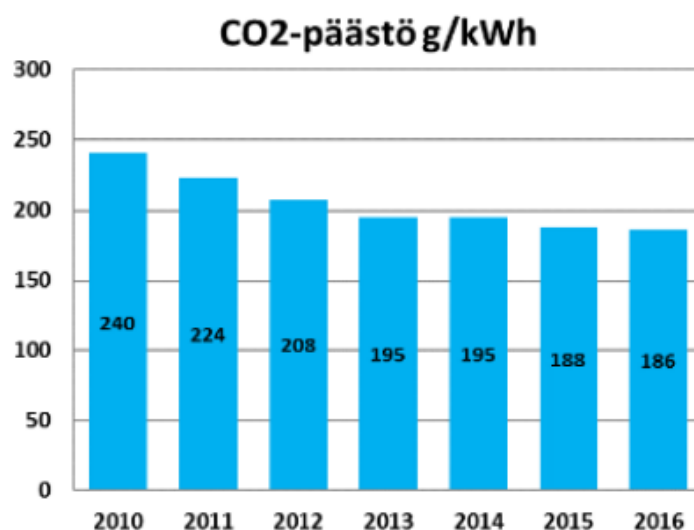
Vuonna 2016 tamperelaisen kaukolämmön tuottamiseen käytettiin polttoaineita kuvien 34 ja 35 mukaisesti. Puu ja turve olivat suurimmat energianlähteet. Kaukolämmön hiilidioksidipäästöt vuonna 2016 olivat yhteensä 186 g/kWh (kuva 36). (Tampereen Sähkölaitos b.)



Kuva 34. Tampereen Sähkölaitoksen kaukolämmön polttoainejakauma (Tampereen Sähkölaitos b.)



Kuva 35. Tampereen Sähkölaitoksen kaukolämmön energialähdejakauma (Tampereen Sähkölaitos b).

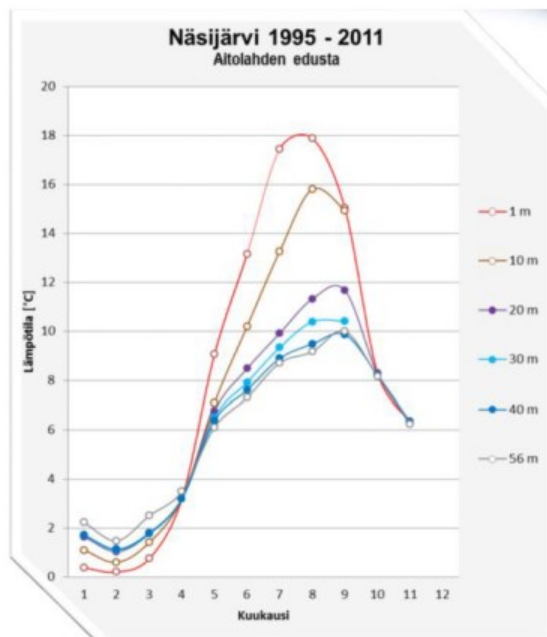


Kuva 36. Tampereen Sähkölaitoksen kaukolämmön hiilidioksidipäästöt (g/kWh) (Tampereen Sähkölaitos b).

Tampereen Sähkölaitos tarjoaa myös kaukojäähdytystä Tampereen keskustan alueella kuvan 37 mukaisesti (Tampereen Sähkölaitos c). Tampereella kaukojäähdytys toteutetaan järven syvänteistä saatavalla kylmällä vedellä, joka hyödynnetään vapaajäähdytyksessä. Kesäaikaan sekä syksyllä lisäjäähdytys toteutetaan jäähdytyskoneilla. Järvestä saatavan jäähdytysenergian osuus kokonaisenergiasta on noin 95 %. Kuvassa 38 on esitetty vuosien 1995-2011 Näsijärven keskilämpötilat eri syvyyksissä kuukausittain. (Tampereen Sähkölaitos 2017b.)



Kuva 37. Kaukojäähdytysalue Tampereella (Tampereen Sähkölaitos c).



Kuva 38. Näsijärven keskilämpötilat kuukausittain eri syvyyksissä vuosina 1995-2011 (Tampereen Sähkölaitos 2017b).

Tampereen kaukojäähdytystoiminta alkoi vuonna 2012, ja tällä hetkellä kaukojäähdytysverkoston pituus on noin 10 kilometriä ja asiakkaita on noin 30. Kaukojäähdytys soveltuu kaikenlaisille kiinteistöille. (Tampereen Sähkölaitos 2017b.)

3.3 Koneellinen jäähdytys

Sisäilman laatutavoitteet ja lämpötilavaatimukset ovat kasvaneet, mikä on lisännyt jäähdytyksen tarvetta niin uusissa kuin peruskorjattavissakin rakennuksissa. Jäähdytys on tuotettava energiatehokkaasti ja uusia energialähteitä hyödyntäen johtuen energiankulutuksen ja päästöjen vähennystavoitteista. (Airaksinen, M. et al. 2015.)

Oikeanlainen ilmanvaihto vähentää niin puhaltimien kuin jäähdytyksenkin sähkönkulutusta sekä vaikuttaa samalla myös lämmönkulutukseen. Lämpötilojen asetus vaikuttaa suoraan jäähdytyksen energiankulutukseen. (Motiva 2016a.)

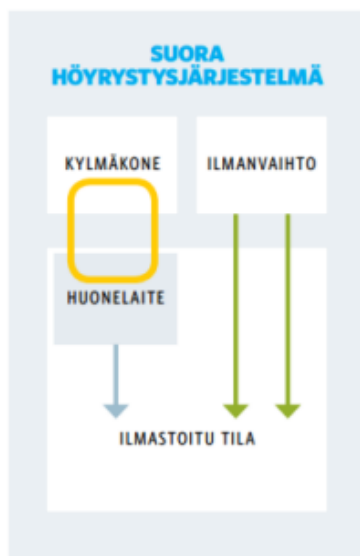
Ilmastointijärjestelmä sisältää useimmiten ilmanvaihdon, ilman suodatuksen, jäähdytyksen sekä lämmityksen ja mahdollisesti kostutuksen (Motiva 2016a). Ilmastoinnin yhtenä tärkeimpänä tehtävänä on hallita sisäilman puhtautta sekä lämpötiloja, jotka aiheutuvat valaistuksesta, ihmisistä, laitteista ja auringonsäteilystä (Heinonen, J. et al. 2014 s. 113).

3.3.1 Suora ja välillinen jäähdytysjärjestelmä

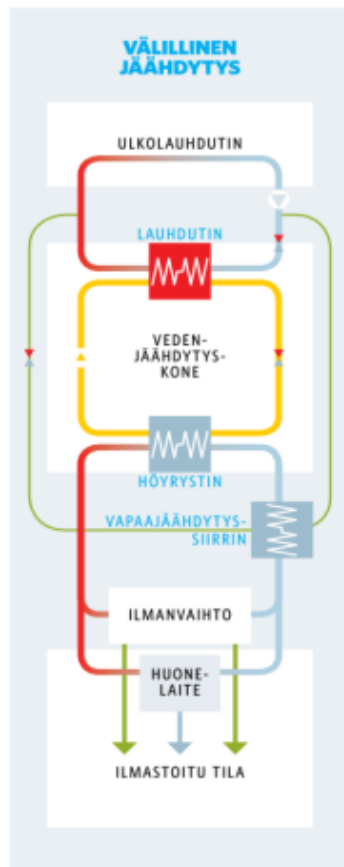
Ilmastoinnin jäähdytysenergia voidaan tuottaa joko koneellisesti tai hyödyntämällä luonnollista kylmää lähdettä, esimerkiksi ulkoilmaa (Motiva 2016a). Jäähdytysjärjestelmät voidaan jakaa suora- ja välillisiin järjestelmiin (Heinonen, J. et al. 2014 s. 243-244).

Suorahöyrystysjärjestelmällä tarkoitetaan lämmön siirtämistä höyrystimen kautta suoraan kylmäaineeseen. Tyypilliset suorahöyrysteiset järjestelmät ovat pientaloissa käytettäviä ilma-ilmalämpöpumppuja. Suorahöyrystysjärjestelmät eivät tarvitse ylimääräisiä pumppuja tai lämmönsiirtimiä, joten ne ovat hankintakustannuksiltaan edullisia ja lähtökohtaisesti energiatehokkaita. Haittapuolia ovat mahdolliset meluhaitat sisällä ja ulkona sekä järjestelmän säädön haasteellisuus. (Laitinen, A. et al. 2016.) Epäsuora eli välillinen jäähdytys tarkoittaa lämmön siirtämistä lämmönvaihtimen kautta väliaineeseen ja edelleen höyrystimen kautta kylmäaineeseen. (Motiva 2016a, Laitinen, A. et al. 2016.)

Kuvissa 39 ja 40 on esitetty suorahöyrystysjärjestelmä sekä välillinen järjestelmä.



Kuva 39. Suorahöyrystysjärjestelmä (Motiva 2016a).



Kuva 40. Välillinen jäähdytys (Motiva 2016a).

Useimmiten ilmastoinnin ja prosessien jäähdytys toteutetaan vedenjäähdytyskoneilla. Vedenjäähdytyskone on välillinen jäähdytysjärjestelmä, jonka toiminta perustuu siihen, että höyrystimessä kylmäaine höyrystyy ja sitoo lämpöä höyrystimen läpi virtaavasta vedestä, jolloin veden lämpötila laskee. Jäähtyneellä vedellä voidaan jäähdyttää ilmastointikoneen tuloilmaa tai se voidaan johtaa viilennettävän tilan jäähdytyslaitteeseen. (Ympäristöministeriö 2016a.)

Kompressorikäyttöisiä vedenjäähdytyskoneita ovat mäntäkompressorit, ruuvikompressorit, kierukkakompressorit (scroll-kompressorit) sekä turbokompressorit. Teholuokiltaan suurempia ovat ruuvi- ja turbokompressorit sekä pienempiä mäntä- ja scroll-kompressorit. (Heinonen, J. et al. 2014.)

Sisälämpötilan asetusarvolla on suuri merkitys jäähdytysjärjestelmän sähköenergian kulutuksen kannalta. Sähköenergian kulutuksessa voidaan säästää huomattavasti, mikäli kuumana kesäpäivänä ollaan valmiita hieman tinkimään mukavuudesta. (Motiva 2016a.)

Koska koneellinen jäähdytys kuluttaa paljon energiaa, pyritään vapaajäähdytystä hyödyntämään, koska siinä sähköä kuluu pääasiassa vain jäähdytysveden kierrättämiseen ja nestejäähdyttimen puhaltimiin. Erityisesti jos jäähdytystä tarvitaan ympäri vuoden, vapaajäähdytyksen merkitys korostuu. (Motiva 2016a.) Vapaajäähdytyksessä jäähdytysteho otetaan usein joko ulkoilmasta, maaperästä tai vesistöstä. Vapaajäähdytyksessä kierto-neste jäähdytetään kylmällä ulkoilmalla tai vaihtoehtoisesti neste pumpataan maaperässä tai vesistössä olevan putkiston kautta takaisin jäähdytettävään rakennukseen. Vapaajäähdytykseksi lasketaan myös viileän ilman tuominen suoraan rakennukseen. (Heinonen, J.

et al. 2014 s. 282.) Koneellista jäähdytystä hyödynnetään, kun vapaajäähdytys ei ole mahdollinen, eli Suomessa pääosin kesäaikaan (Motiva 2010, Motiva 2016a). Energiaa voidaan säästää, riippuen ulkolämpötilasta, jopa yli 90 % jatkuvalla jäähdytysteholla hyödynnettäessä ulkoilman vapaajäähdytystä. Ulkolämpötilan ollessa +10 °C energiansäästö on 35 %, ulkolämpötilan ollessa +5 °C energiansäästö on 75 % ja ulkolämpötilan ollessa alle 0 °C on energiansäästö jopa yli 90 %. (Motiva 2016a.)

3.3.2 Lauhduttimet

Myös lauhduttamisessa on sekä suora että välillinen järjestelmä. Suora lauhduttaminen tarkoittaa lämpöenergian siirtymistä kylmäaineesta suoraan esimerkiksi ulkoilmaan, kun välillinen lauhduttaminen tarkoittaa lämpöenergian siirtymistä väliaineen, kuten liuoksen, välityksellä esimerkiksi ulkoilmaan.

Jäähdytysjärjestelmät ovat ilma-, vesi- tai liuoslauhdutteisia. Etenkin kesäkäytössä olevat, paljon kotitalouksissa ja muissa pienissä kohteissa hyödynnettävät, jäähdytyskoneet toteutetaan ilmalauhdutteisina. Vesilauhdutteisia koneita taas hyödynnetään suurta jäähdytystarvetta vaativissa kohteissa, sekä kun saatavilla on lähes ilmaista hyvälaatuista lauhdutusvettä, kuten esimerkiksi joki-, järvi- tai jäähdytystornivettä. Liuoslauhdutteiset vedenjäähdyttimet ovat hyödyllisiä, kun kompressorin ja lauhduttimen välinen etäisyys on liian suuri, lauhdelämpöä halutaan ottaa talteen, vapaajäähdytystä halutaan hyödyntää tai kun kylmäainetäytös halutaan pitää pienenä. (Heinonen, J. et al. 2014 s. 250-258.)

3.3.3 Kylmäaineet

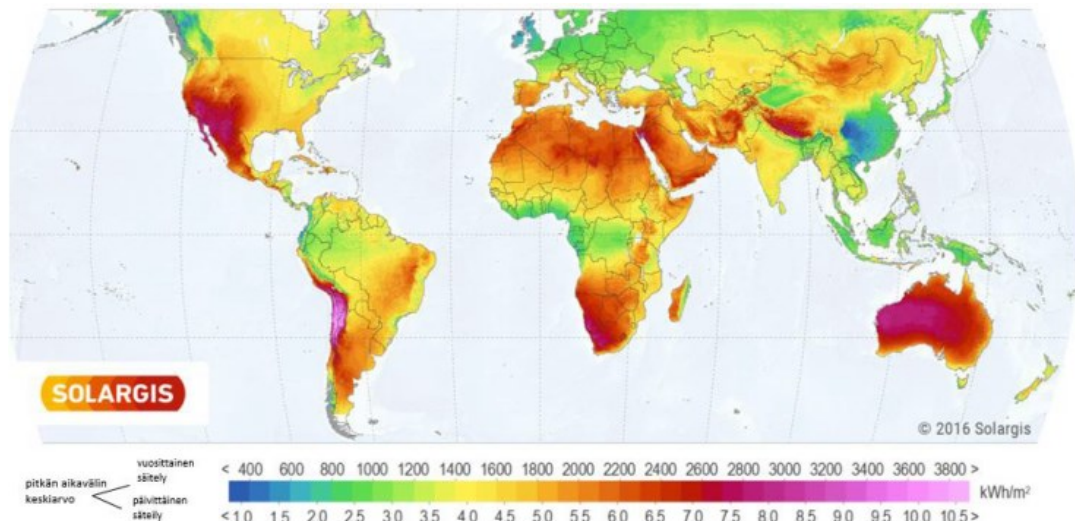
Tavallisesti koneellisissa järjestelmissä on hyödynnetty jäähdytysaineena CFC-yhdisteitä eli niin sanottuja freoneja. Freonien, samoin kuin HCFC-yhdisteiden, on todettu tuhoavan yläilmakehän otsonikerrosta ja tästä johtuen niiden käytöstä uusissa jäähdytyskoneissa luovuttiin viime vuosituhannen lopussa. Lisäksi ilmastoinnin jäähdytyslaitteissa usein käytetty HCFC-kylmäaine R22:n käyttö lopetettiin myös vanhojen laitteiden huollossa vuoden 2015 alussa. Nykyisin ilmastoinnin jäähdytykseen käytettävät kylmäaineet ovat R134a isoissa vedenjäähdyttimissä sekä R410A pienemmissä laitteissa. (Motiva 2016a, Ympäristöministeriö 2015.)

Kylmäaineiden käyttöä jäähdytyskoneissa on viime vuosikymmeninä säännelty niin EU:n asetuksin kuin kansainvälisin sopimuksinkin. Montrealin pöytäkirja allekirjoitettiin vuonna 1987 ja se perustuu vuonna 1985 tehtyyn Wienin sopimukseen. Montrealin pöytäkirja käsittää sopimuksia otsonikerrosta heikentävien aineiden käytön ja valmistuksen vähentämiseksi. Pöytäkirjan vaatimusten vastaavuutta tarkistetaan uusimpaan tutkimustietoon säännöllisesti, jotta sen toimivuus voidaan varmistaa. Myös kehitysmaiden velvoitteisuus varmistetaan toimivalla rahoitusjärjestelmällä. (Ympäristöministeriö 2015.)

3.4 Aurinkoenergia

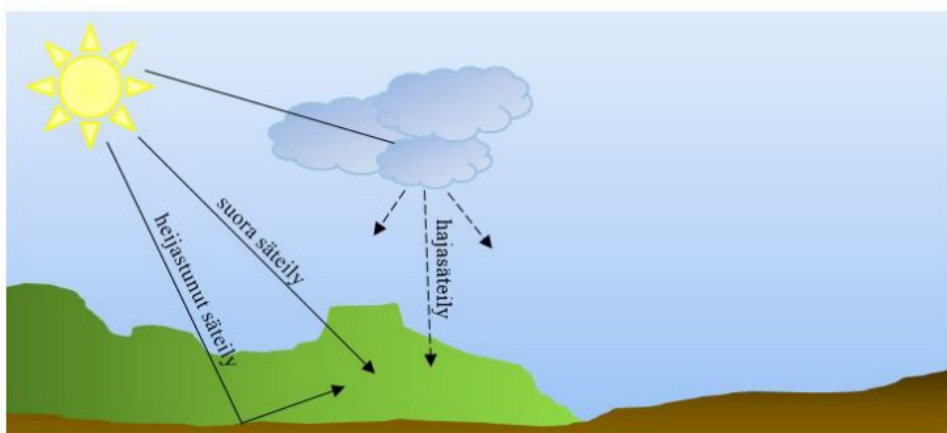
Auringon säteilyenergiaa voidaan hyödyntää niin sähkön kuin lämmön tuotannossa. Aurinko on tärkein uusiutuva energialähde, jota on maailmassa eniten saatavilla ja joka ei ehdy miljardeihin vuosiin. Aurinko vaikuttaa epäsuorasti tai suorasti kaikkiin muihin energiamuotoihin, paitsi ydinvoimaan. Vesivoima perustuu auringon meristä ja järvistä höyrystämään veteen, joka sataa takaisin maalle muodostaen vesiputouksia. Tuulivoima taas perustuu auringon synnyttämiin lämpötilaeroihin, joista syntyy korkea- ja matalapaineita, mitkä aiheuttavat tuulta. (Motiva 2016b.)

Auringon säteilyteho maan pinnalla on 170 000 TW, mutta vain pieni osa tästä kyetään hyödyntämään energiantuotannossa. Pinta-alaa kohden teho on melko pieni erityisesti pohjoisemmissa maissa, kuten Suomi. Suomeen kirkkaana päivänä osuu noin 1-2 kWh/m², kun taas lähempänä päiväntasaajaa, kuten Egyptissä, lukemat saattavat olla jopa 7 kWh/m². (Energiateollisuus e.) Kuvassa 41 on esitetty maailman päivittäinen ja vuosittainen suora säteilynsaanti pinta-alaa kohden.



Kuva 41. Säteilynsaanti pinta-alaa kohden (Solargis).

Auringon kokonaissäteily koostuu suorasta säteilystä, heijastuneesta säteilystä sekä hajasäteilystä alla olevan kuvan mukaisesti. Kun aurinko paistaa pilvettömältä taivaalta, säteily on pääasiassa suoraa säteilyä. Pilvisellä säällä säteily on pelkästään hajasäteilyä. Heijastunutta säteilyä ilmenee voimakkaasti erityisesti talvella, kun auringonsäteily heijastuu lumesta. (Motiva 2016b.)

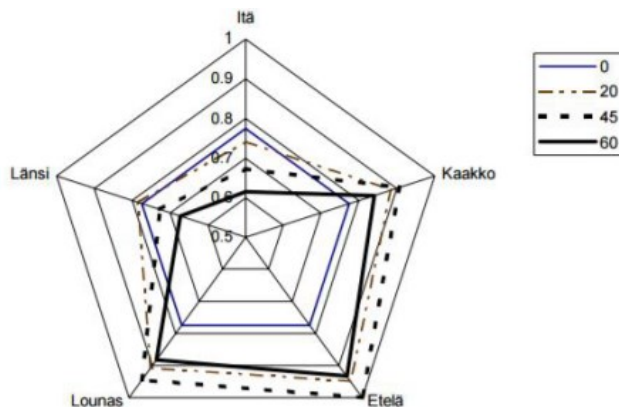


Kuva 42. Auringon kokonaissäteilyn jakautuminen (Ilmatieteen laitos b).

3.4.1 Auringonsäteilyä vastaanottavan tason sijoittaminen

Aurinkokeräimen toiminnan kannalta on tärkeää, että auringonsäteily pääsee osumaan keräimen pintaan mahdollisimman esteettömästi. Tämän takia esimerkiksi talojen katot ovat hyvä paikka aurinkokeräimien asennukselle. (Aurinkoteknillinen yhdistys ry.)

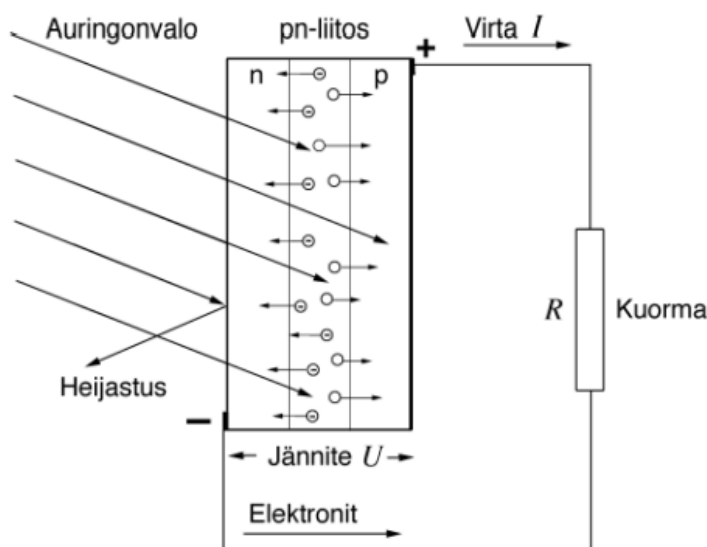
Keräimen sijoittamisessa tulee huomioida sekä suuntakulma että kallistuskulma. Ottamalla huomioon Maan pyöriminen oman akselinsa ympäri, sekä Maan kiertoliike Auringon ympäri yhdistettynä ratatason ja Maan akselin väliseen kallistuskulmaan aiheuttaa, että auringon näennäinen rata muuttuu päivittäin. Auringon korkeuskulma Etelä-Suomessa leveyspiirillä 60° on talvisin keskipäivällä 7° ja kesällä 53°. Paras asennussuunta aurinkolämpökeräimelle on etelä, mutta kallistuskulma riippuu keräimestä, sekä siitä mitä halutaan painottaa ja minkälaiset ympäristön ominaisuudet ovat. Painottaessa koko vuoden tuottoa, paras kallistuskulma on 45°, mutta mikäli tuottoa halutaan optimoida kesällä, keräimen voi asentaa loivempaan kulmaan. (Aurinkoteknillinen yhdistys ry.) Kuvassa 43 on esitettyä aurinkokeräimen suuntauksen ja kallistuskulman vaikutus vuosittaiseen lämmöntuottoon.



Kuva 43. Aurinkokeräimen suuntauksen ja kallistuskulman vaikutus vuosittaiseen lämmöntuottoon. I =paras tuotto ($=300\text{--}400 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$). (Solpros Ay.)

3.4.2 Aurinkokennot

Auringon säteilyenergia voidaan muuttaa suoraan sähköksi aurinkokennon avulla. Aurinkokenno on suuriläpimittainen diodi, jonka toiminta perustuu puolijohderajapintaan, jonka molemmiin puoliin on n- ja p-tyypin puolijohde. N-tyypin materiaali on negatiivisesti varautunut, eli siinä on paljon elektroneja, kun taas p-tyypin materiaali on positiivisesti varautunut ja siinä on paljon aukkoja. Auringon valon osuessa kennoon elektronit vaeltavat kerrosten välisen rajapinnan yli ja siirtyvät toiselle puolelle. Tätä kutsutaan valosähköiseksi ilmiöksi ja se saa kennossa aikaan sisäisen sähkökentän kerrosten yli. (Motiva 2016b.) Kuvassa 44 on esitetty aurinkokennon toimintaperiaate.



Kuva 44. Aurinkokennon toimintaperiaate (Suntekno).

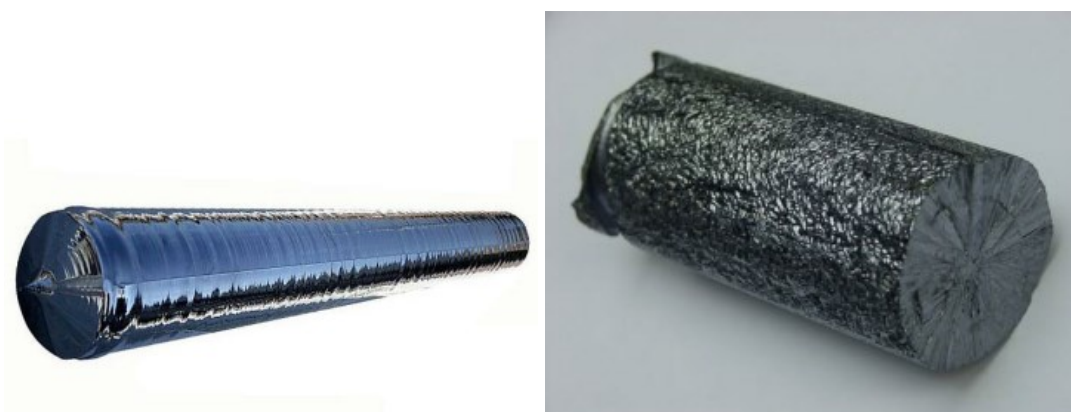
Aurinkokennot jaetaan kolmeen eri sukupolveen niiden teknologian mukaan. Ensimmäisen sukupolven muodostavat kiteisestä piistä valmistetut aurinkokennot, jotka ovat nykyään valta-asemassa lähes 90 % markkinaosuudella. Toisen sukupolven muodostavat ohutkalvoteknologialla valmistetut aurinkokennot, ja kolmannen sukupolven aurinkokennot ovat nanoteknologialla valmistetut sekä muut tulevaisuudessa kehitteillä olevat aurinkokennot. (Luque & Hegedus 2003, Motiva 2017b.)

3.4.2.1 Kiteisestä piistä valmistetut aurinkokennot

Yleisin aurinkokennojen valmistusmateriaali on pii (Si), jota voidaan käyttää niin yksikiteisenä, monikiteisenä kuin amorfisenakin. Yksi- ja monikiteisestä piistä valmistetut aurinkokennot muodostavat ensimmäisen sukupolven aurinkokennot. Yksikiteisestä piistä valmistetut aurinkokennot ovat hyötysuhteeltaan parempia kuin monikiteisestä piistä valmistetut, mutta maksavat taas monikiteisiä enemmän. Yksikiteisestä piistä valmistetun kennon hyötysuhteeksi on parhaimmillaan dokumentoitu 25 % ja monikiteisestä piistä valmistetun kennon hyötysuhteeksi 20 %. Kaupallisissa ratkaisuissa hyötysuhteet ovat huomattavasti pienempiä, yksikiteisissä piikennossa hyötysuhteet ovat 14 % luokkaa ja monikiteisissä piikennossa 12 % luokkaa. (Solar tech USA, Luque & Hegedus 2003.)

Piikennon hyötyjä on sen ympäristöystävällisyys. Ympäristöön ei vapaudu myrkyllisiä aineita vanhoja piikennoja kierrätettäessä, toisin kuin esimerkiksi toisen sukupolven ohutkalvopaneeleista, joissa käytetään kadmiumia. (Luque & Hegedus 2003.)

Monikiteisen piin valmistaminen on yksikiteistä helpompaa, koska pii saadaan monikiteiseksi yhdistämällä sulaa piitä sen kiinteään olomuotoon. Yksikiteisen piin valmistaminen on melko monimutkaista, koska raaka-aineen tulee olla hyvin puhdasta ja sen valmistus on teknisesti haastavaa, mistä johtuu yksikiteisen aurinkokennon suuret valmistuskustannukset. (Luque & Hegedus 2003.) Kuvissa 45 ja 46 on esitetty yksikiteisen sekä monikiteisen piin rakenne.

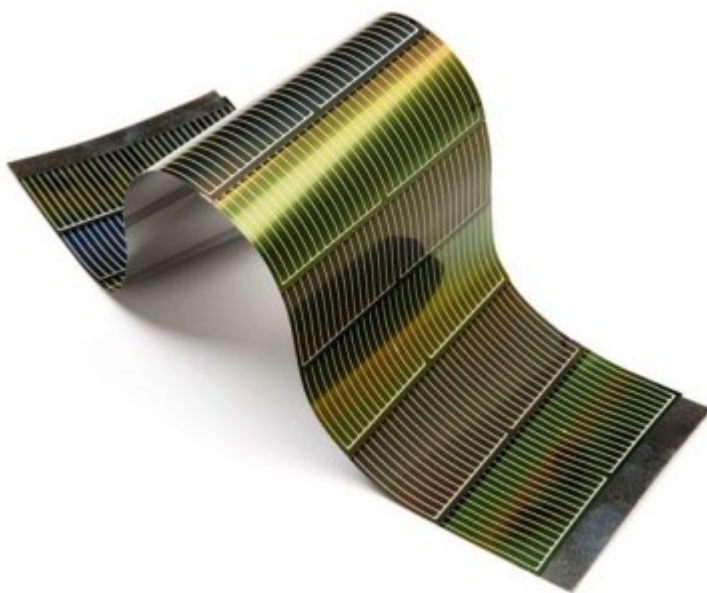


Kuva 45 ja Kuva 46. Yksikiteisen ja monikiteisen piin rakenne (Thompson 2016).

3.4.2.2 Ohutkalvokennot

Toisen sukupolven muodostavat ohutkalvotekniikkaan perustuvat aurinkokennot. Ensimmäisen sukupolven aurinkokennojen korkeat valmistuskustannukset ovat johtaneet uusiin, kustannustehokkaampiin tapoihin valmistaa aurinkokennoja. Ensimmäiset ohutkalvokennot tehtiin kuparisulfidista (Cu_2S) ja kadmiumsulfidista (CdS) 1960-luvulla, josta lähtien katsotaan ohutkalvoteknologian alkaneen. Vuonna 1981 saavutettiin ensimmäisenä 10 % hyötysuhde ohutkalvotekniikkaan perustuvissa aurinkokennoissa. Kuparisulfidin ja kadmiumsulfidin lisäksi kupari-indiumselenidin (CuInSe_2 , lyhenne CIS), kadmiumtelluridin (CdTe) ja amorfisen piin (a-Si) käyttö aurinkokennoissa yleistyi 1970-1980-luvuilla, ja jokainen niistä saavutti myös 10 % hyötysuhteen. 1990-luvulla ohutkalvotekniikkaan perustuvien aurinkokennojen hyötysuhteet kasvoivat selkeästi: kupari-indium-gallium-selenidin (CuInGaSe_2 , lyhenne CIGS) yli 19 %:iin, kadmiumtelluridin reiluun 16 %:iin ja amorfisen piin reilu 10 %:iin. (Fraas & Partain 2010.)

Ohutkalvokennojen hyötysuhde on vain noin puolet yksikidekennojen hyötysuhteesta, mikä on tämän teknologian huonoja puolia. Lisäksi ohutkalvopaneeleissa hyödynnettävän telluurin vähyys maapallolla on ongelma, samoin kuin paneeleissa käytettävän kadmiumin haitallisuus ympäristölle ja terveydelle. Toisaalta taas ohutkalvokennojen on todettu toimivan varjossa muita aurinkokennoja paremmin, mikä mahdollistaa pienen sähköntuotantomäärän myös pilvisemmällä säällä. Lisäksi ohutkalvopaneelit ovat joustavia, eivätkä ne erotu rakenteista paksujen kiteisten paneelien tapaan. (Fraas & Partain 2010.) Kuvassa 47 on esitetty ohutkalvopaneeli, josta tulee ilmi sen joustavuus.



Kuva 47. Ohutkalvopaneeli (*Building materials online*).

3.4.2.3 Muut aurinkokennotyypit

Kolmannen sukupolven aurinkokennot ovat yhä tutkimuksen alla. Kolmannen sukupolven aurinkokennoja ovat muun muassa nanotekniikkaan perustuvat väriaineaurinkokennot, jotka poikkeavat valmistustavoiltaan sekä toiminnaltaan edellä mainituista kennoista. Väriaineaurinkokennot kehittivät Michael Grätzel ja hänen kollegansa 1990-luvun alkupuolella.

Väriaineaurinkokenno on sähkökemiallinen kenno, jonka toiminta muistuttaa luonnon fotosynteesiä. Valon osuessa kennojen titaanidioksidinanopartikkelien pintaan kiinnittyneisiin väriainemolekyyleihin tuottavat ne sähköä. Väriainekennot ovat parhaimmillaan saavuttaneet 10 % hyötysuhteen. (Aitola 2012, Grätzel 2003.)

Kolmanteen sukupolven kuuluvat myös orgaaniset aurinkokennot, jotka koostuvat polymeerisista ohutkalvoista, jotka ovat asetettu valoa läpäisevien elektrodien väliin. Orgaanisissa aurinkokennoissa käytetään materiaaleina yleisiä alkuaineita, joiden saatavuus ei ole ongelma. Lisäksi ne ovat kevyempiä ja halvempia kuin piikennot. Ainoaksi haasteeksi muodostuu hyötysuhde, joka on merkittävästi piikennoja huonompi. Parhaimmillaan orgaanisissa kennoissa on päästy 8,3 % (Partanen 2010) hyötysuhteeseen. (Aitola 2012, Grätzel 2003.)

Koska aurinkosähköä käytetään laajalti myös muun muassa satelliiteissa sekä NASA:n avaruussukkuloissa, on aurinkokennoille olemassa myös niin kutsuttu avaruusteknologia. Aurinkokennot joutuvat avaruudessa erittäin voimakkaan hiukkassäteilyn altistamaksi, joten kennot täytyy olla valmistettu kestävästä materiaalista, kuten vaikka galliumarsenidista (GaAs). Galliumarsenidi on todella kallista ja siitä syystä maanpäällisissä aurinkokennoratkaisuissa harvinaisempi näky. Avaruusteknologian aurinkokennot muodostavat aurinkopaneelin, joka on tehty monikerrostekniikalla. Eri kerrokset vastaavat auringon spektrin eri aallonpituuksiin ja kykenevät näin hyödyntämään paremmin auringon säteilyn eri aallonpituudet. Avaruusteknologian aurinkopaneeleilla on parhaimmillaan päästy

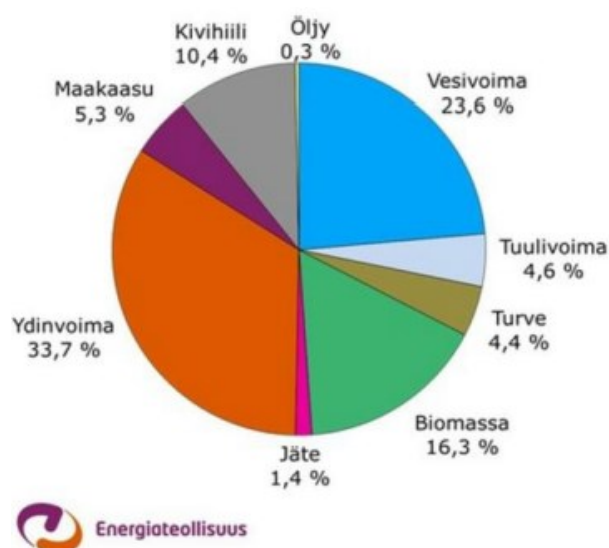
jopa 40 % hyötysuhteeseen. (Luque & Hegedus 2003.) Kuvassa 48 on italialaisen avaruuslentäjän, Samantha Cristoforettin, ottama kuva aurinkokennostosta helmikuulta 2015 Kansainväliseltä avaruusasemalta. Aurinkokennosto sisältää yhteensä 262400 kennoa ja on pinta-alaltaan noin 2500 m². Järjestelmän siipiväli on noin 73 metriä. Kaiken kaikkiaan neljä kennostoa voi tuottaa yhteensä jopa 120 kW sähköä. (NASA 2015.)



Kuva 48. Aurinkokennosto kuvattuna Kansainväliseltä avaruusasemalta (NASA 2015).

3.4.3 Aurinkoenergia Suomessa

Suomen energiankulutus oli 1335 PJ eli 371 TWh vuonna 2016, josta 34 % tuotettiin uusiutuvalla energialla. Sähkönkulutus samaisena vuonna oli 85,1 TWh, josta 45 % tuotettiin uusiutuvalla. Aurinkoenergian osuus on niin pieni sähköntuotannosta (alle 1 ‰), ettei sitä huomioida sähkömarkkinoissa (kuva 49). (Tilastokeskus 2017b, Energiateollisuus f.)



Kuva 49. Sähköntuotanto energialähteittäin 2016 (Energiateollisuus f.).

Suomen aurinkoenergian tuotantopotentiaali on itseasiassa varsin suuri, vaikkakin yleinen kuva Suomen aurinkoenergiapotentiaalista on täysin päinvastainen. Suomi vastaa Keski-Eurooppaa aurinkoenergian tuotossa, ja esimerkiksi Lappeenrannassa aurinkosähkön tuotantopotentiaali on Frankfurtin veroinen. Saksassa aurinkosähkön tuotanto on 1500 kertaa enemmän asukasta kohden verrattuna Suomeen, vaikkakin aurinkoa saadaan molemmissa maissa vuositason lähestulkoon saman verran. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014.)

Suomen matala ympäristön lämpötila on etuna aurinkoenergian tuotossa, koska aurinkokennojen hyötysuhde paranee, mitä kylmempää on. Aurinkoenergian tuottaminen itsessään on ilmaista – vain investointi ja asentaminen maksavat. Aurinkopaneelit eivät saastuta eikä aurinkoenergian tuottaminen aiheuta melua. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014.)

Aurinkoenergian osuus sähköntuotannosta Suomessa on tällä hetkellä alle promille. Suunta on toki tästä ylöspäin, mutta mikäli tavoitteeksi asetettaisiin esimerkiksi prosentin osuus sähköntuotannosta vuoteen 2022 mennessä, tarvittaisiin kiinteistöjen katolle 330000 kpl 3 kW:n aurinkosähkövoimalaa. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014.)

Auringon kokonaissäteily koostuu suorasta säteilystä, heijastuneesta säteilystä sekä hajasäteilystä. Hajasäteilyn osuus kokonaissäteilystä on Suomessa merkittävä, ja Etelä-Suomessa noin puolet vuoden säteilystä on hajasäteilyä. Aurinkopaneelin tuoton kannalta ei ole oleellista, onko siihen osuva säteily suoraa vai hajasäteilyä. Keskittävien sekä aurinkoa seuraavien järjestelmien käyttö toki perustuu suoran säteilyn tehokkaaseen hyödyntämiseen, joten ne eivät ole taloudellisesti kannattavia ratkaisuja Suomessa. (Motiva 2016c.)

Helsingissä vuotuinen säteily määrä vaakasuuralle pinnalle on noin 975 kWh/m² ja Sodankylässä se on noin 790 kWh/m². Suuntaamalla paneelit etelään ja 45 asteen kallistuskulmaan, voidaan saavuttaa 20-30 prosentin lisäys säteilyn määrään vuositason. (Ilmatieteen laitos c.) Kuvassa 50 on esitetty vuotuiset säteilymäärät optimaalisesti kallistetuille pinnoille Suomessa. Kuvassa 51 on esitetty etelään suunnatun, 45 asteen kulmaan asetetun, 130 W:n ja 1 m²:n aurinkosähkökeräimen tuotto Helsingissä eri kuukausina.



Kuva 50. Vuotuinen säteily määrä optimaalisesti kallistetuille pinnoille Suomessa (Motiva 2016c).



Kuva 51. Aurinkosähkökeräimen tuotto (Motiva 2016b).

4 Hiedanrannan aluetarkastelu

Tässä osassa esitellään Tampereen uusi kaupunginosa Hiedanranta, esitellään ja analysoidaan alueen rakennustyyppejä, niiden energian- ja tehontarpeita sekä energiantuotantovaihtoehtoja ja niistä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt.

Hiedanrannan alue sijaitsee Tampereen Lielahdessa Metsä Boardin entisen sellutehtaan alueella noin neljän kilometrin päässä keskustasta (kuva 52). Hiedanrannan kaupunginosan pinta-ala on noin 115 hehtaaria, ja se rajoittuu etelässä kantatiehen 65 sekä Sellukadun varren tontteihin, lännessä Lielahdenkatuun, pohjoisessa Niemenrannan kaupunginosaan ja idässä Näsijärveen. Vanha tehdasalue sekä pitkä rantaviiva tarjoavat monia mahdollisuuksia niin rakentamisen kuin energiantuoton kannalta. (Tampereen kaupunki a.)



Kuva 52. Hiedanrannan alue (Tampereen kaupunki a.).

4.1 Aluetarkastelua ohjaavia tekijöitä

Kappaleessa käsitellään asioita, joilla on vaikutusta Hiedanrannan alueella tehtäviin energiaratkaisuihin, kuten esimerkiksi alueella toteutettava energia- ja ilmastopolitiikka, päästöt ja energiatase sekä maankäytön ja rakentamisen lainsäädäntö.

4.1.1 Energia- ja ilmastopolitiikka

Tampereen kaupungin energia- ja ilmastopolitiikkaa toteutetaan hyvin laajasti eri sitoumuksin ja sopimuksin. Toimintaa linjaavat erinäiset kaupungin omat, alueelliset sekä kansalliset ja kansainväliset sopimukset, kuten Kuntien energiatehokkuussopimus, Kaupunginjohtajien yleiskokouksen sitoumus sekä Tampereen kaupunkiseudun ilmastostrategia.

Tampereen kaupunki on solminut työ- ja elinkeinoministeriön kanssa vuonna 2007 vapaaehtoisin Kuntien energiatehokkuussopimuksen (KETS). Sopimuksen tavoitteena on energiankäytön tehostaminen sekä uusiutuvien energialähteiden käytön lisääminen. Li-

säksi Tampereen kaupunki on sitoutunut eurooppalaiseen Kaupunginjohtajien yleiskokoukseen (Covenant of Mayors) vuonna 2009, jonka mukaan kaupungin tulee vähentää hiilidioksidipäästöjä vähintään 20 % vuoteen 2020 mennessä vuoden 2005 tasosta. (Tampereen kaupunki 2016b.)

Tampereen kaupunkiseudun ilmastostrategia 2030 hyväksyttiin seudun kunnan- ja kaupunginvaltuustoissa vuonna 2010. Ilmastostrategia määrittelee kuntien yhteisen ilmasto- ja ympäristöpolitiikan vision, tavoitteet sekä toimenpiteet tavoitteiden saavuttamiseksi. Päävisiona on Tampereen seudun nouseminen Suomen kärkitasolle päästöjen vähentämisessä. Lisäksi merkittävässä roolissa ovat energiatehokkuus ja uusiutuvan energian osuuden lisääminen. (Tampereen kaupunki b.)

Tampereen kaupungin ympäristöpolitiikka 2020 hyväksyttiin kaupunginvaltuustossa vuonna 2012 ja se sisältää kuusi teemaa, joille on määritelty tavoitteet vuosille 2050 ja 2020 sekä toteutustoimenpiteet ja kehittämisohjelmia vuoteen 2016 mennessä. Nämä kuusi teemaa liittyvät ympäristöjohtamiseen, ekotehokkaisiin hankintoihin sekä kaupunkirakenteeseen, ympäristöä säästäviin teknisiin verkostoihin, luonnonsuojeluun ja ympäristön tilan parantamiseen. Pääteemana ympäristöpolitiikassa 2020 on ”Ennakointia ja vastuullisia toimintatapoja”. (Tampereen kaupunki 2016b.)

Tampere on asettanut tavoitteeksi olla hiilineutraali vuonna 2050. Tavoitteen saavuttamiseksi luodaan ilmasto- ja energiatiekartta sekä askelmerkit yhdessä tamperelaisten toimijoiden kanssa. Tiekarttaan kerätään tietoa ilmastotyön ja energiasuorituksen tämänhetkisestä tilasta ja kootaan yhteen tavoitteet ja keskeisimmät toimenpiteet näiden tavoitteiden saavuttamiseksi. (Tampereen kaupunki 2016b.)

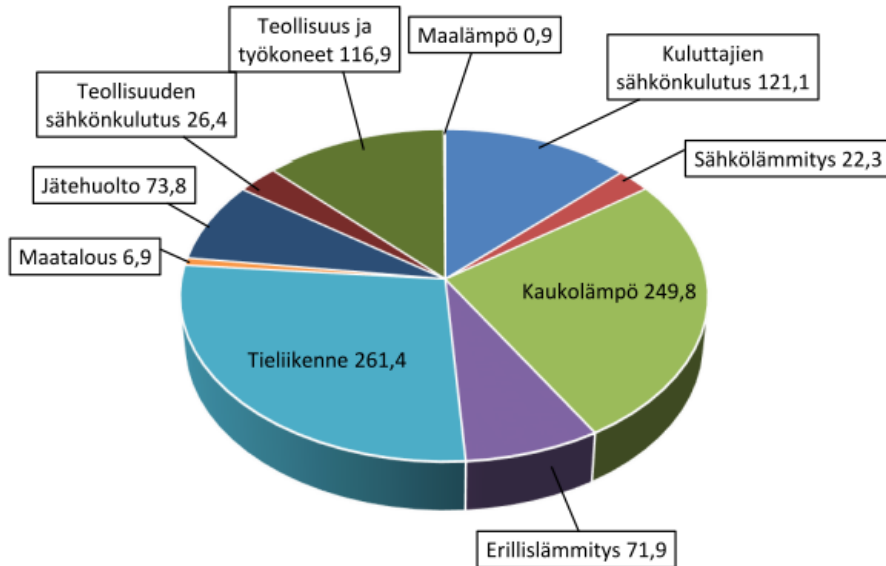
4.1.2 Tampereen kasvihuonekaasupäästöt ja energiatase

Tampereen kasvihuonekaasujen päästöt on saatu Tampereen CO₂-raportista, jossa on Tampereen kasvihuonekaasupäästöt vuosilta 1990 sekä 2010-2015. Kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa on huomioitu kauko-, sähkö- ja erillislämmitys, maalämpö, kuluttajien ja teollisuuden sähkönkulutus, tieliikenne, teollisuus ja työkoneet sekä maatalous ja jätehuolto. Laskennassa on huomioitu ihmisen toiminnan aiheuttamat tärkeimmät kasvihuonekaasut hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄) sekä dityppioksidi (N₂O).

Tiedot kasvihuonekaasupäästöistä on saatu monesta eri lähteestä. Sähkönkulutuksen päästötiedot perustuvat Energiateollisuus ry:n tilastoihin, rakennusten lämmityksestä aiheutuvat päästötiedot on saatu Tilastokeskuksen, Motiva Oy:n ja Metlan tiedoista sekä kaukolämmön toimittajilta. Teollisuuden päästötiedot on saatu ympäristöhallinnon VAHTI-tietokannasta saatavien polttoaineiden käyttömäärätietojen avulla sekä muutamille yrityksille tehdyistä kyselyistä. Lisäksi VTT:n TYKO-mallia on hyödynnetty bensiinikäyttöisten työkonoiden päästölaskennassa ja öljy- ja biopolttoaineala ry:n tietoja on hyödynnetty ”teollisuus ja työkoneet” –sektorin päästölaskennassa. Tieliikenteen päästötiedot on saatu VTT:n LIISA-mallista, jätehuollon päästötiedoissa on hyödynnetty Suomen ympäristökeskuksen (SYKE), ympäristöhallinnon ja Suomen biokaasulaitosrekisterin tietoja sekä Suomen kasvihuonekaasuinventaarion menetelmiä. Maatalouden päästöt on laskettu perustuen eläinten lukumääriin sekä Suomen kasvihuonekaasuinventaarion eläintyyppikohtaisiin päästökertoimiin. Eläinten lukumäärätiedot on saatu Maaseutuviiraston (MaVi) maaseutuelinkeinohallinnon tietojärjestelmästä sekä Suomen Hippos ry:stä. (Tampereen kaupunki 2017.)

Vuonna 2015 Tampereen kasvihuonekaasupäästöt olivat yhteensä 951,4 kt CO₂-ekv. Suurimmat päästöjen aiheuttajat olivat kuvan 53 mukaisesti tieliikenne (261,4 kt CO₂-ekv.) sekä kaukolämpö (249,8 kt CO₂-ekv.).

Tampereen kasvihuonekaasupäästöt 2015 (kt CO₂-ekv.)

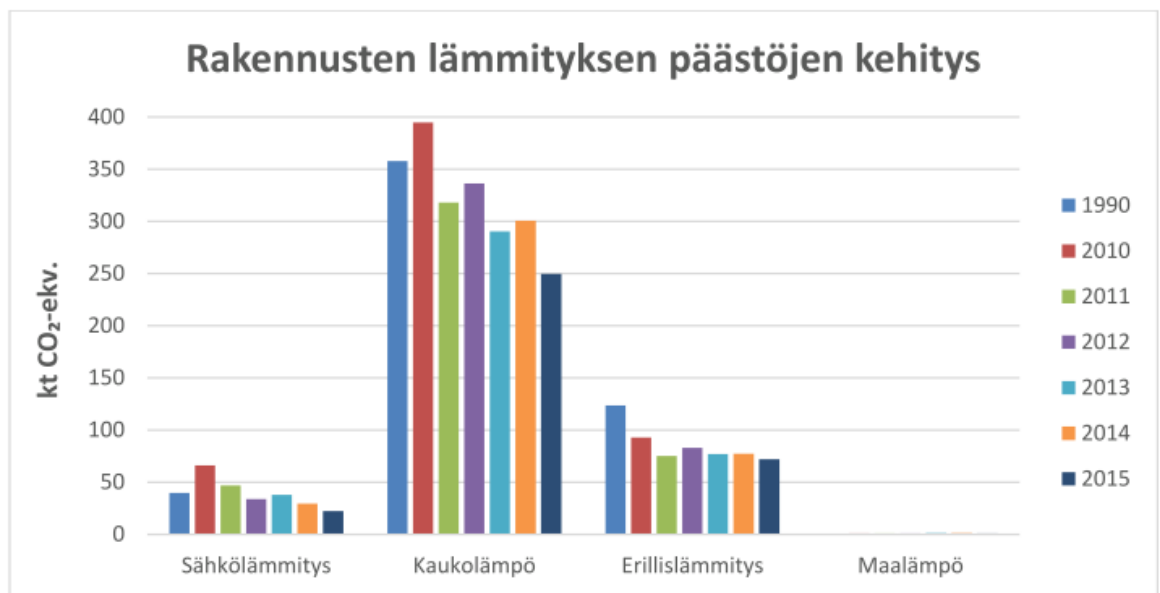


Kuva 53. Tampereen kasvihuonekaasupäästöt 2015 (Tampereen kaupunki 2017).

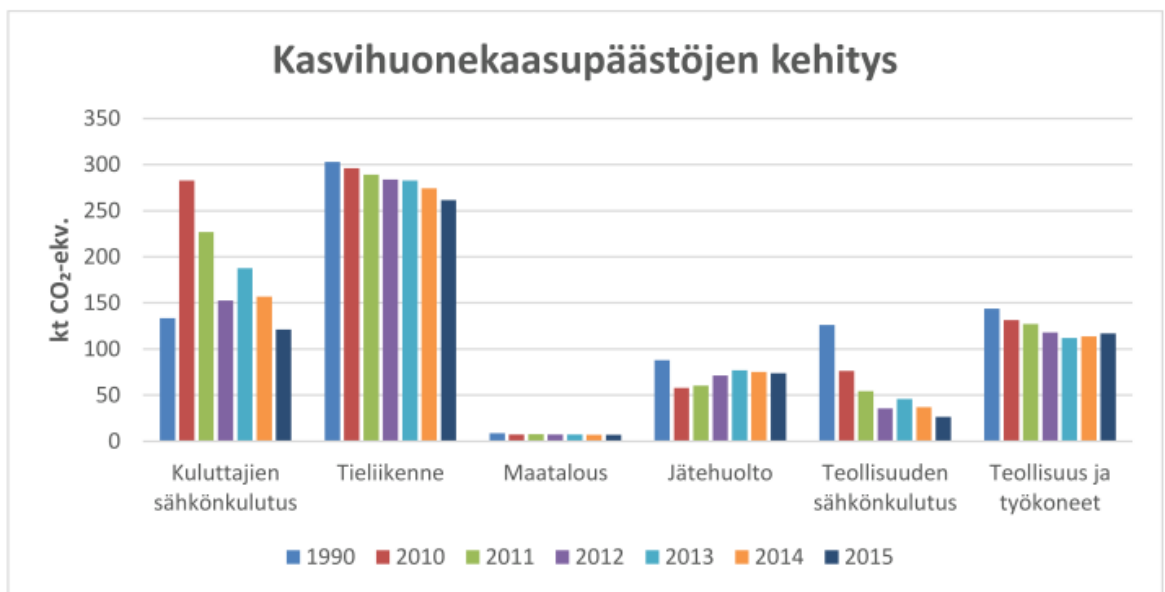
Kuvassa 54 on esitetty Tampereen kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjen kehitys ja kuvassa 55 rakennusten lämmityksestä aiheutuvien päästöjen kehitys vuonna 1990 sekä vuosina 2010–2015. Lisäksi kuvassa 56 on kooste muiden sektoreiden kasvihuonekaasupäästöjen kehityksestä samaisina vuosina.



Kuva 54. Tampereen kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjen kehitys (Tampereen kaupunki 2017).



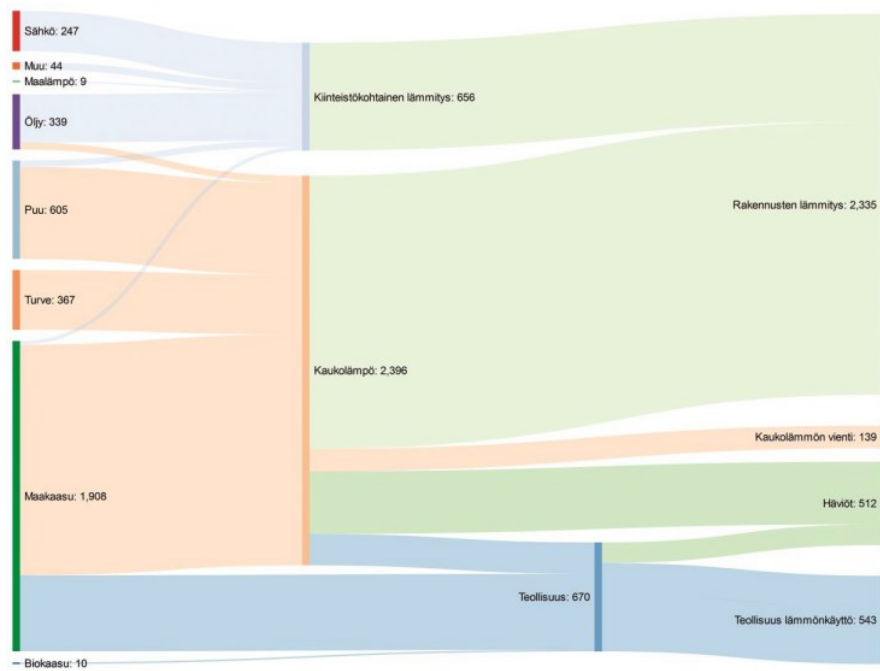
Kuva 55. Rakennusten lämmityksen päästöjen kehitys Tampereella (Tampereen kaupunki 2017).



Kuva 56. Eri sektoreiden kasvihuonekaasupäästöjen kehitys Tampereella (Tampereen kaupunki 2017).

Tampereen alueen kaukolämmön tuottaa Tampereen Sähkölaitos Oy. Naistenlahden voimalaitoksilla tuotettiin vuonna 2016 yhteensä 857,7 GWh lämpöä, Lielahden voimalaitoksella 362,4 GWh, Tammervoiman hyötövoimalaitoksella 362,4 GWh ja lämpökeskuksissa yhteensä 668,5 GWh lämpöä. (Tampereen Sähkölaitos 2017a.)

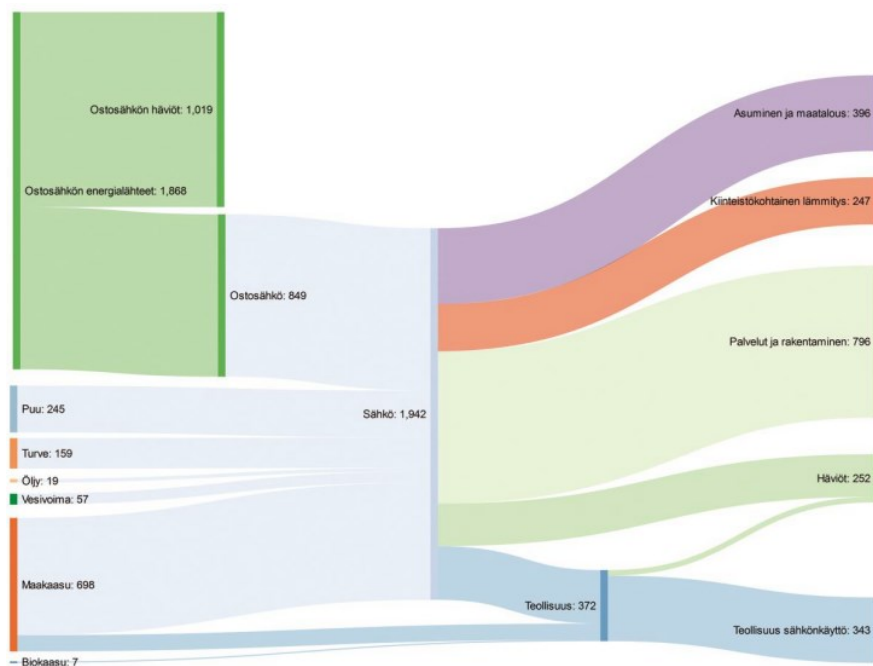
Kuvassa 57 on esitetty Tampereen kaupungin lämmöntuotannon energiatase vuonna 2014, mistä huomataan, että valtaosa lämmöstä käytetään kuluttajien toimesta kaukolämpönä, minkä lisäksi myös teollisuuden lämmönkulutus vie suuren osan. (Ramboll Finland Oy 2016.)



Kuva 57. Tampereen lämmöntuotannon energiatase vuonna 2014 (GWh) (Ramboll Finland Oy 2016).

Tampereen sähköntuotannosta vastaa myöskin Tampereen Sähkölaitos Oy. Vuonna 2016 sähköntuotanto oli noin 692 GWh. Lielahden voimalaitos tuotti tästä 42 % (290,6 GWh), Naistenlahden voimalaitokset tuottivat yhteensä 38,9 % (269,2 GWh), vesivoimalla tuotettiin 9 % (62,3 GWh), Tammervoiman hyötövoimalaitos 7,4 % (51,2 GWh) ja tuulivoimalla tuotettiin 2,7 % (18,7 GWh). (Tampereen Sähkölaitos 2017a.)

Alla kuvassa on Tampereen sähköntuotannon energiatase vuonna 2014.



Kuva 58. Tampereen sähköntuotannon energiatase vuonna 2014 (Ramboll Finland Oy 2016).

4.1.3 Maankäytön ja rakentamisen lainsäädäntö

Vuonna 2000 tuli voimaan maankäyttö- ja rakennuslaki, joka koskee ja ohjaa alueiden käyttöä, suunnittelua ja rakentamista. Kunnissa on erikseen maankäyttöä ja rakentamista ohjaava kaavoitus sekä rakennusjärjestely. Tampereen kaupungin rakennusjärjestyksessä annetaan paikallisista oloista johtuvia maankäyttöä ja rakentamista koskevia määräyksiä. Määräyksillä pyritään ”edistämään ekologisesti, taloudellisesti, sosiaalisesti ja kulttuurillisesti kestävä kehitys, suunnitelmallista ja sopivaa rakentamista sekä terveellisen, viihtyisän, sosiaalisesti toimivan ja erityisryhmien tarpeet huomioivan elin- ja toimintaympäristön toteuttamista”. (Tampereen kaupunki 2014.)

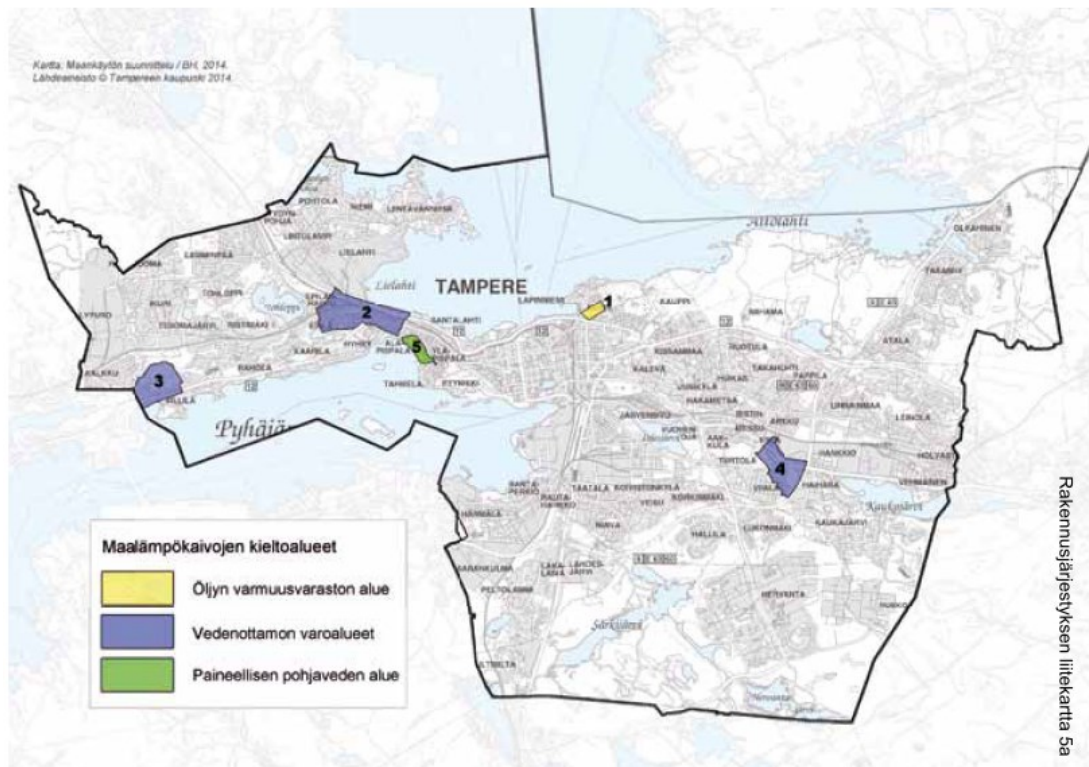
4.1.3.1 Maalämpöä koskeva lainsäädäntö

Maalämpöjärjestelmän rakentaminen vaatii maankäyttö- ja rakennuslain (1999/132) 126 § mukaisen toimenpideluvan. Lisäksi 125 § mukaan rakennuslupa tarvitaan erinäisiin rakennuksen korjaus- ja muutostöihin, joilla voidaan vaikuttaa rakennuksen energiatehokkuuteen. Rakennuslupa tarvitaan myös tapauksiin, joissa rakennuksen käyttötarkoitus olennaisesti muuttuu. (Finlex 1999.)

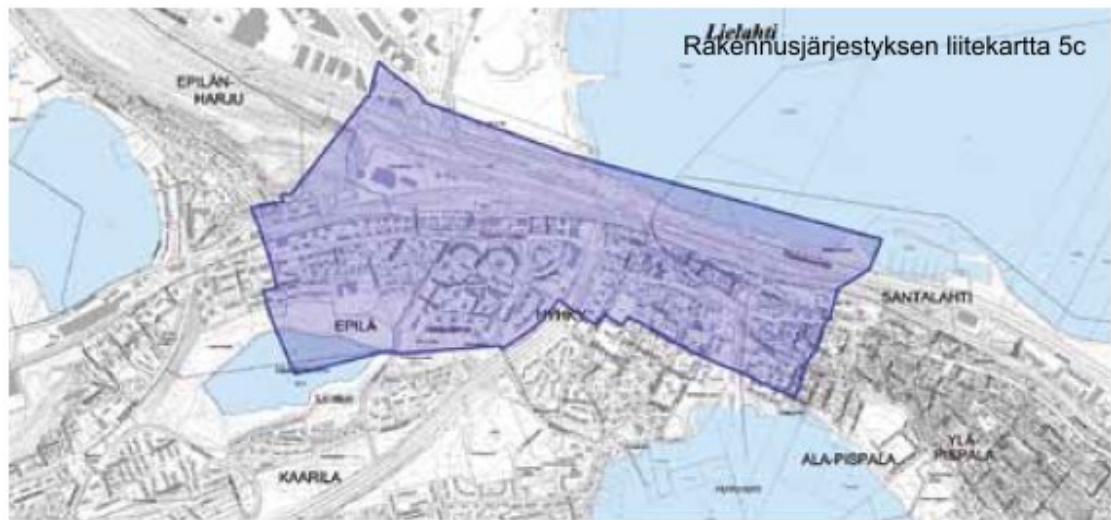
Tampereen kaupungin rakennusjärjestys määrää myös energiahuollosta. Maalämmön käyttöönotto (porakaivo, maapiiri, vesistöasennus) vaatii rakennusvalvontaviranomaisen luvan. Kantakaupungin ulkopuolisilla asemakaavoittamattomilla alueilla rakennusvalvontaviranomaisen lupaa ei tarvita. Tästä huomautuksena pohjavesialueet, joissa lupa kuitenkin tarvitaan. (Tampereen kaupunki 2014.)

Porakaivon poraamisessa tulee huomioida kaivojen etäisyys toisistaan, sekä maankäytössä tilanne, jossa maalämmön hyödyntäminen saattaisi rajoittaa naapuruston vastaavaa hyödyntämisen mahdollisuutta. Porakaivojen etäisyys toisistaan tulee olla vähintään 15 metriä, jotta vierekkäiset reiät eivät vaikuta vähentävästi yhdestä kaivosta saatavaan energiamäärään. Kaivon poraamisesta tulisi kysyä lupa myös naapurilta, mikäli porareian etäisyys naapurin tontin rajasta on alle 7,5 metriä. Porakaivon etäisyys viemäreihin, vesijohtoihin ja kaukolämpöputkiin tulee olla vähintään 3 metriä. (Tampereen kaupunki 2014.)

Maalämpöjärjestelmän rakentamisessa tulee myös huomioida putkistossa käytettävän lämmönsiirtoaineen vaarattomuus ympäristölle ja terveydelle, pintavesien pääsemättömyys pohjavesiin, maalämpökaivojen kieltoalueet sekä porausedellytykset mahdolliseen pilaantuneeseen maahan, kuten kaatopaikan läheisyyteen, poratessa. (Tampereen kaupunki 2014.) Alla olevissa kuvissa on esitetty maalämpökaivojen kieltoalueet Tampereella sekä erityisesti Hiedanrannan alueella.



Kuva 59. Maalämpökaivojen kieltoalueet Tampereella (Tampereen kaupunki 2014).



Kuva 60. Hiedanrannan alueen maalämpökaivojen kieltoalue (Tampereen kaupunki 2014).

4.1.3.2 Vesistölämpöä koskeva lainsäädäntö

Lämmönkeruuputkiston asentaminen vesistöön katsotaan vesirakennustyöksi. Siihen tarvitaan vesialueen omistajan lupa sekä elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen lausunto, jonka perusteella määräytyy, vaatiiko hanke lisäksi aluehallintoviraston luvan. (Tampereen kaupunki 2014.)

Lämmönkeruuputkiston asentaminen vesistöön ei välttämättä vaadi lupaa aluehallintovirastolta, mutta mikäli putket sijoittuvat yleiselle uittoväylälle tai joessa (valuma-alue yli

100 km²) tai salmessa olevalle valtavyölle, edellyttää sijoittaminen luvan hakemista. (Ympäristöhallinto 2013.)

4.1.3.3 Aurinkoenergiaa koskeva lainsäädäntö

Aurinkoenergiaan liittyvät lupakäytännöt vaihtelevat kunnittain. Tampereella aurinkopaneelien sijoittaminen rakennukseen, rakennelmaan tai pihamaalle ei vaadi lupaa, kun asennus suoritetaan ohjeiden mukaisesti. Ohjeeseen sisältyy muun muassa, että järjestelmä asennetaan voimassa olevan asemakaavan määräyksiä ja rakentamiseen liittyviä säännöksiä noudattaen, järjestelmän asentamiselle on kiinteistön omistajan tai haltijan lupa, järjestelmä on suunniteltu kaupunkikuvaan sopivaksi, paneelit sijoitetaan ensisijaisesti rakennuksen pihanpuoleiselle katon lappeelle, paneelien pinnat eivät saa aiheuttaa häiriötä tai häikäisyä ympäristöön ja naapureille on tiedotettu hankkeesta.

Hanke edellyttää suunnitelman hyväksynnän tai toimenpideluvan, mikäli järjestelmä asennetaan asemakaavan, rakennussuojelu- tai muun lain nojalla suojeltuun rakennukseen, arvorakennukseen tai kaupunkikuvallisesti näkyvään paikkaan. Myös jos järjestelmän katsotaan laajuudeltaan täyttävän aurinkovoimalan kriteerit, edellytetään toimenpidelupaa. (Tampereen kaupunki 2016a.)

4.2 Case Hiedanranta

4.2.1 Lähtötiedot ja oletukset

Hiedanrannan alueen yleiskaava laaditaan osana kantakaupungin yleiskaavaa. Yleiskaavan tavoitteista päätettiin vuonna 2015, ja näiden tavoitteiden pohjalta valmisteltiin vuoteen 2017 mennessä lopullinen hyväksyttävä yleiskaava, jonka tavoitevuosi on 2040. Vuosina 2018-2019 on tavoitteena laatia alueen ensimmäiset asemakaavat. (Tampereen kaupunki a.)

Tätä työtä varten määrittelyt Hiedanrannan rakennuskannan osalta tehtiin yleiskaavan ja kansainvälisen ideakilpailun pohjalta sekä asiakkaan kanssa sovituksi. Arvio eri käyttötarkoituksiluokkiin kuuluvien rakennusten määrästä ja pinta-aloista on siis melko karkea. (Tampereen kaupunki a.)

4.2.1.1 Kansainvälinen ideakilpailu

Tampereen kaupunginhallituksen suunnittelukokous päätti 25.4.2016 hyväksyä Hiedanrannan kehittämisen tavoitteet sekä järjestää kansainvälisen ideakilpailun alueen kaupunkisuunnittelulle. (Tampereen kaupunki a.)

Hiedanrannan kaupunginosan tavoitteena on kasvaa tulevaisuuden kaupunginosaksi, joka koetaan houkuttelevaksi asumiselle, työpaikoille sekä kaupunkielämän toiminnoille. Lisäksi Hiedanrannan tavoitteena on alueen monikäyttöisyys tarkoittaen keskustamaista asumista yhdistettynä järven rannan tarjoamiin virkistätymismahdollisuuksiin sekä muihin toimintoihin. Myös muun muassa työpaikkojen monipuolisuus, hyvä liikenteellinen saavutettavuus, kiertotaloudellisuus, alueen kilpailukykyisyys sekä palveluiden saataavuus ovat tärkeässä roolissa tavoitteiden asettamisessa. (Tampereen kaupunki a.)

Kansainvälinen ideakilpailu Hiedanrannan alueen suunnittelusta päättyi 21.9.2016 ja tulokset julkaistiin 10.1.2017. Kilpailulle parhaiten asetetut tavoitteet täyttivät tuomariston

äänestyksellä Hiedanrannan innovaatiolahti sekä Reflecting TRE. (Tampereen kaupunki a.)

Hiedanrannan innovaatiolahden visio Hiedanrannan alueen suunnittelussa on ”omaksua Hiedanrannan teollisen historian perinteille rakentaen, luoden ympäristön, joka yhdistää alueen ainutlaatuisen historian, uuden teknologian, kasvavat liiketrendit sekä laadukkaan rakennetun ympäristön, joka saattaa sosiaalisen, taloudellisen, ekologisen ja kulttuurillisen säästävyyden tasapainon”. Kuvissa 61 ja 62 ovat Hiedanrannan innovaatiolahden kokonaissuunnitelma sekä havainnekuva Hiedanrannan alueen tulevaisuudesta. (Tampereen kaupunki c.)



Kuva 61. Hiedanrannan innovaatiolahti, kokonaissuunnitelma Hiedanrannasta (Tampereen kaupunki c).



Kuva 62. Hiedanrannan innovaatiolahti, havainnekuva Hiedanrannasta (Tampereen kaupunki c).

Reflectin TRE:n visio Hiedanrannasta on ”urbaani, elävä kaupunginosa, joka toimii alueellisenä kasvunvauhdittajana, innovaatioiden alustana ja linkkinä Tampereelta maailmalle”. Kuussa 63 ja 64 on Reflectin TRE:n suunnitelmat Hiedanrannan tulevaisuudesta kokonaissuunnitelmakuvin sekä havainnekuvin. (Tampereen kaupunki c).



Kuva 63. Reflectin TRE, kokonaissuunnitelma Hiedanrannasta (Tampereen kaupunki c).



Kuva 64. Reflectin TRE, havainnekuva Hiedanrannasta (Tampereen kaupunki c).

4.2.1.2 Kerrostalon tiedot

Ensimmäinen alussa määrittelemistämme tutkittavista kokonaisuuksista on yksi asuinkerrostalo. Tutkittavaksi kohteeksi valikoitui 8-kerroksinen nykyhetken rakentamismääräysten mukainen kerrostalo, jonka kerrosala on 3500 m² ja tilavuus 9100 m³. Huoneistoja kerrostalossa on yhteensä 56 kpl.

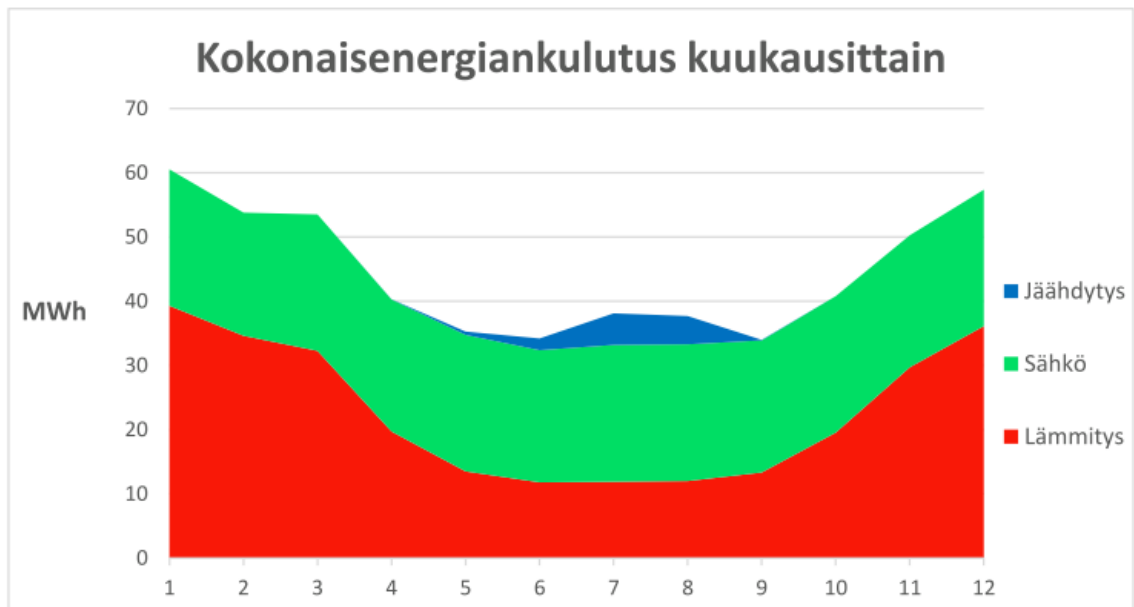
4.2.1.3 Korttelin rakennustyypit ja kerrosalat

Toinen määrittelemistämme tutkittavista kohteista on kortteli. Kortteliin kuuluvia rakennuksia on yhteensä 7 kappaletta: 5 asuinkerrostaloa sekä 2 toimistorakennusta. Rakennukset ovat nykyhetken rakentamismääräysten mukaisia. Rakennustyypit ja -määrät arvioitiin yleiskaavan ja kansainvälisen ideakilpailun pohjalta sekä asiakkaan kanssa sovittu. Korttelin yhteiskerrosala on 31040 m² ja yhteistilavuus 89500 m³.

4.2.2 Asuinkerrostalon energiankulutus ja tehontarpeet

Asuinkerrostalon energiankulutus ja tehontarpeet on saatu simuloimalla valittu kerrostalo IDA ICE -ohjelmistolla sekä RIUSKA-ohjelmistolla. Kerrostalolle on saatu simuloinnin tuloksena kokonaisenergiankulutus sekä lämpö-, jäähdytys- ja sähköenergiankulutukset ja tehontarpeet.

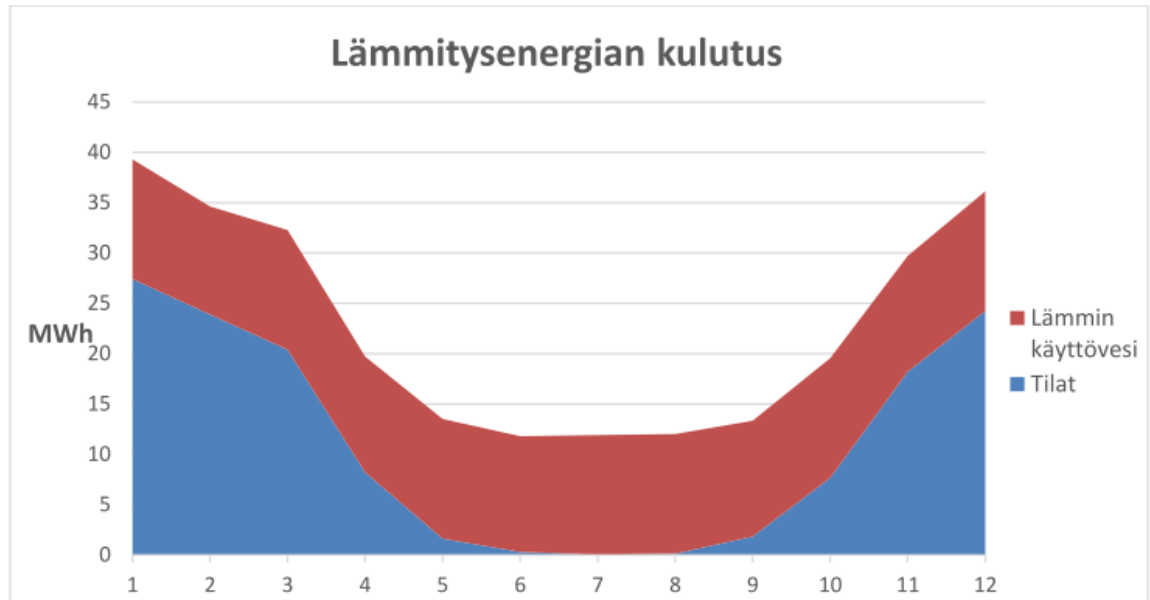
Kuvassa 65 on esitettyä kerrostalon kokonaisenergiankulutus kuukausittain. Kuvasta nähdään, että lämmityksen osuus kokonaisenergiankulutuksesta on suurinta talvikuukausina. Sähköenergiankulutus on hyvin tasaista läpi vuoden, kun taas jäähdytykselle on tarvetta vain kesäkuukausina.



Kuva 65. Kerrostalon kokonaisenergiankulutus kuukausittain.

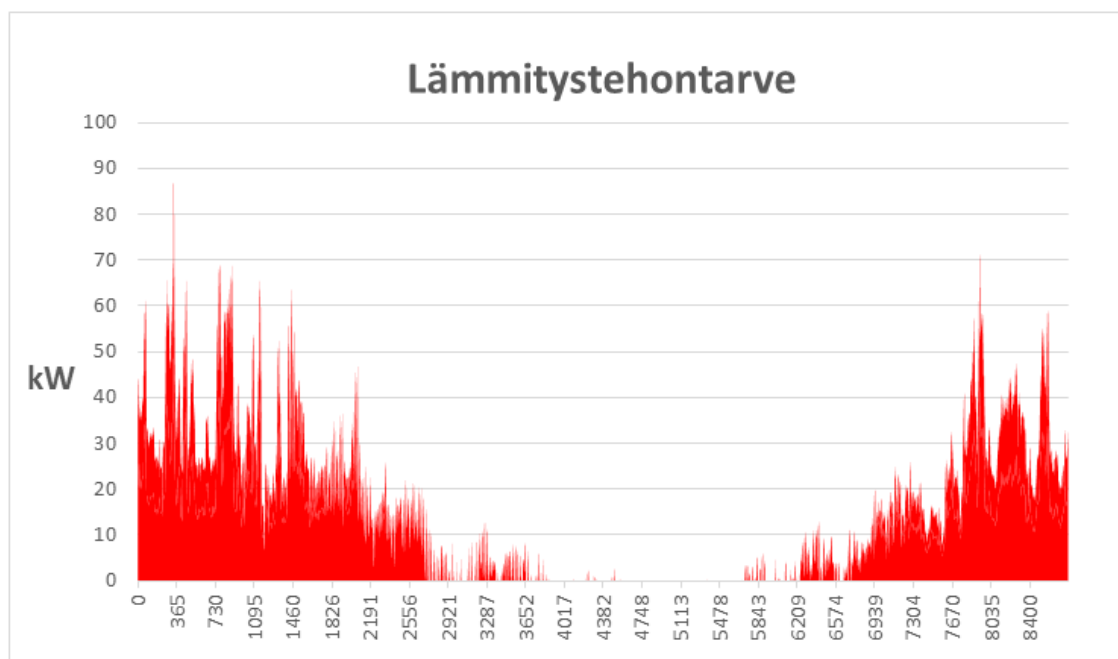
4.2.2.1 Lämmitysenergia ja -teho

Kuvassa 66 on kerrostalon lämmitysenergian kulutus kuukausittain eriytettynä tilojen lämmitykseen ja käyttöveden lämmitykseen. Kuten kuvasta nähdään, käyttöveden lämmitykseen kuluva energia on läpi vuoden lähes sama, kun taas tilojen lämmitystä ei ke-
sääikaan ole juuri lainkaan.



Kuva 66. Kerrostalon vuotuinen, kuukausittainen lämmitysenergian kulutus eriytettynä tilojen lämmitykseen ja käyttöveden lämmitykseen.

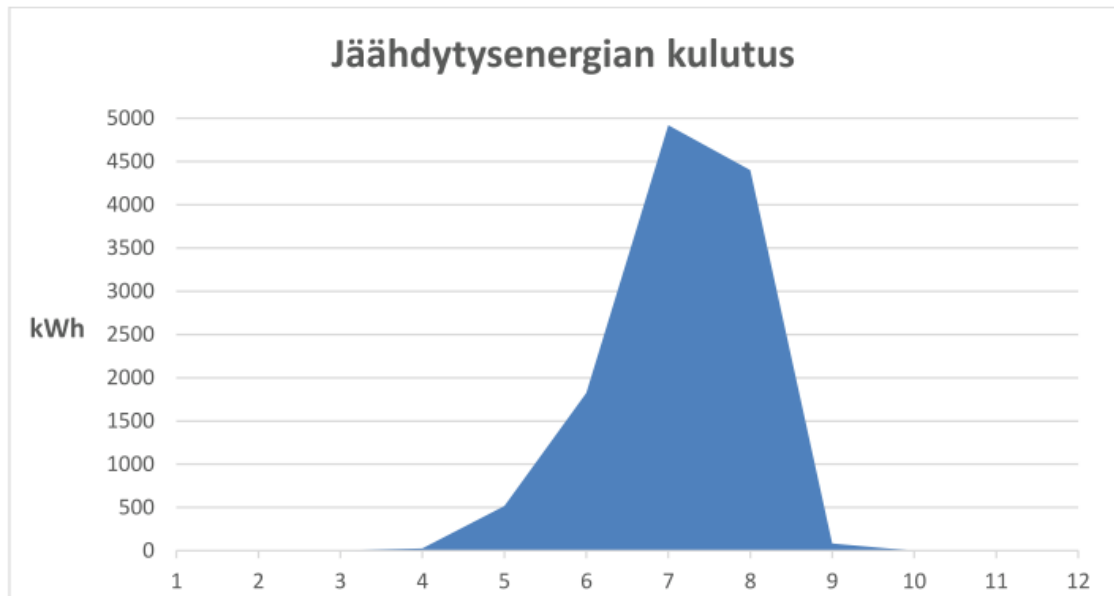
Alla olevassa kuvassa on esitetty kerrostalon kokonaislämmitystehontarve vuoden ajalta. Tehohuiput sijoittuvat kuvan mukaisesti talvikuukausille. Kerrostalon lämmityksen huipputeho saavutetaan 14. tammikuuta ja se on 87,5 kW.



Kuva 67. Kerrostalon vuotuinen, tunnittainen lämmitystehontarve.

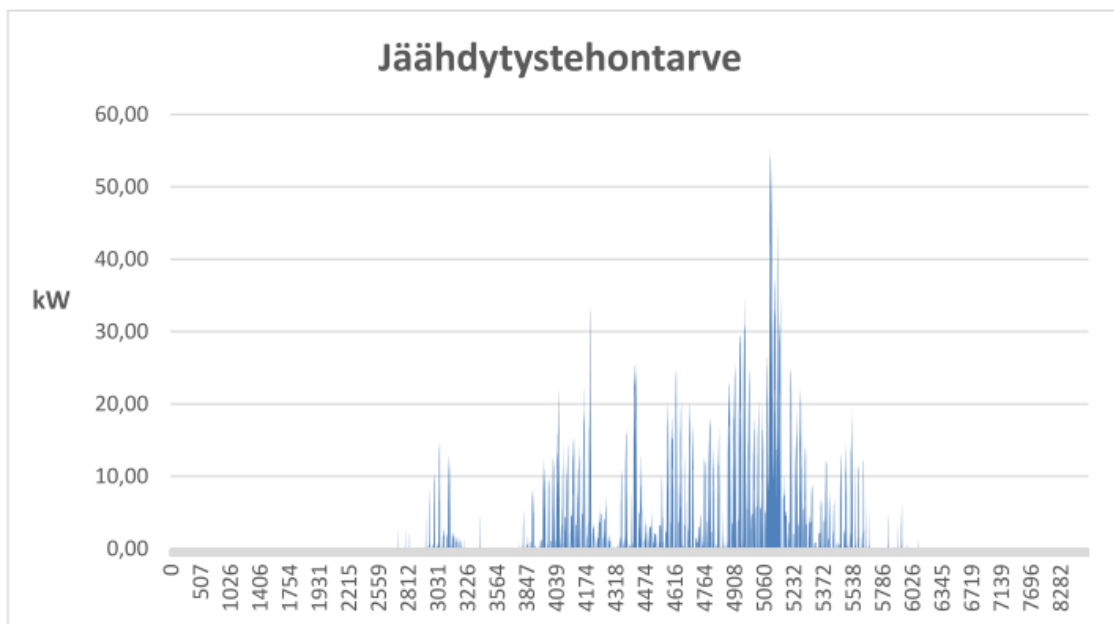
4.2.2.2 Jäähdytysenergia ja -teho

Tässä tapauksessa on oletettu, että kerrostalossa on käytössä jäähdytys. Jäähdytystä tarvitaan kuvan 68 mukaisesti vain kesäaikaan huolehtimaan, etteivät sisälämpötilat nouse määräysten mukaisen rajan yli.



Kuva 68. Kerrostalon vuotuinen, kuukausittainen jäähdytysenergian kulutus.

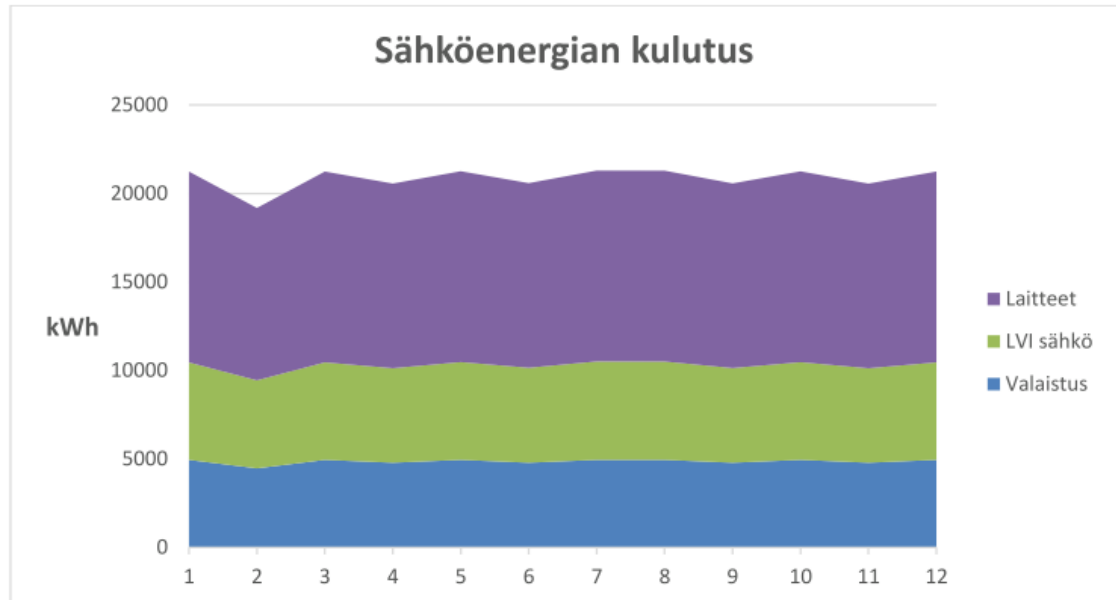
Kuvassa 69 on esitetty vuoden tunnittaiset jäähdytystehontarpeet. Suurin jäähdytysteho tarvitaan 1. elokuuta ja se on 55,2 kW.



Kuva 69. Kerrostalon vuosittainen, tunnittainen jäähdytystehontarve.

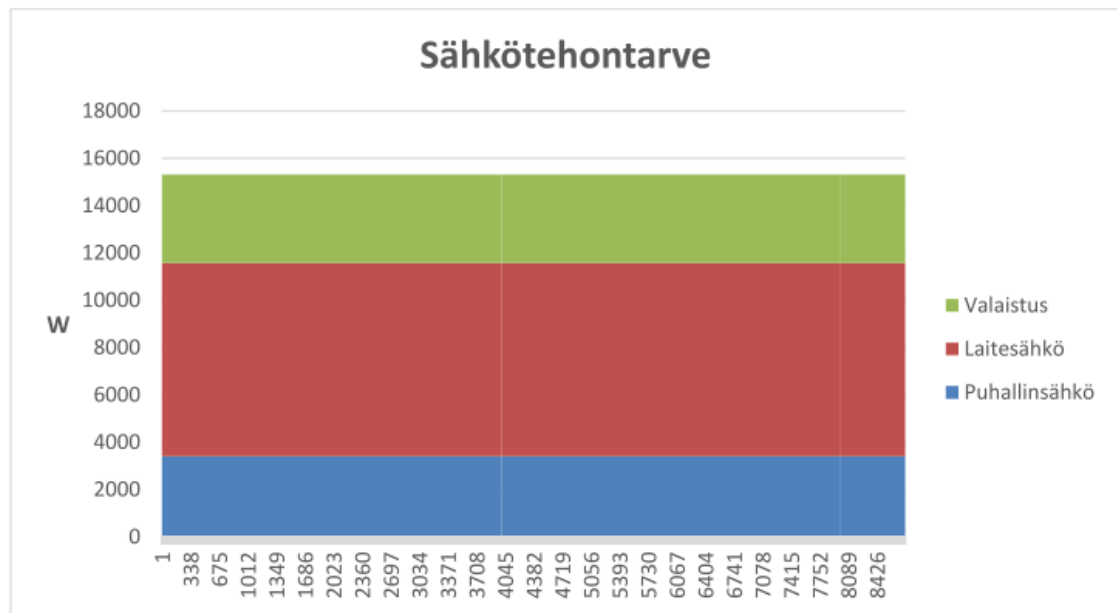
4.2.2.3 Sähköenergia ja -teho

Kuvassa 70 on esitetty kerrostalon sähköenergian kulutus eriteltynä laitesähköön, LVI sähköön sekä valaistussähköön. Toisin kuin lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutus, sähköenergian kulutus on lähes tasaista ympäri vuoden. Pienin kulutus helmikuussa johtuu sen vuorokausien vähäisyydestä.



Kuva 70. Kerrostalon vuosittainen, kuukausittainen sähköenergian kulutus.

Kuvassa 71 on simuloinnin tuloksena saatu kerrostalon vuotuinen, tunnittainen sähköteho. Tunnittainen sähköteho neliömetriä kohden on vakio, ja koska RakMK D3-määräysten mukainen asuinkerrostalon käyttöaika on 24 tuntia päivässä ja 7 päivää viikossa, sähköteho pysyy samana vuorokauden ja vuoden ympäri. Sähköteho on eritelty valaistukseen, laitesähköön ja puhallinsähköön. Huipputeho on noin 15310 W vuoden ympäri.

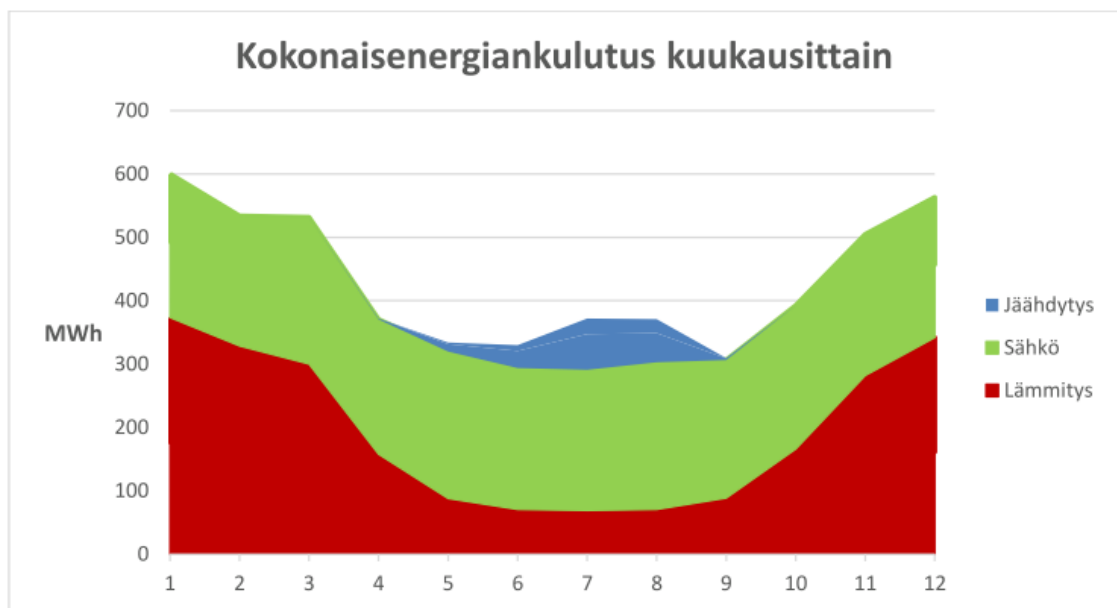


Kuva 71. Asuinkerrostalon vuotuinen, tunnittainen sähkötötehtäntä.

4.2.3 Korttelin energiakulutus ja tehontarpeet

Korttelin energiakulutus ja tehontarpeet on saatu edellisen kohdan kerrostalon simuloinnin sekä toimistorakennuksen simuloinnin tuloksena. Simuloinnit on tehty IDA ICE –ohjelmistolla sekä RIUSKA-ohjelmistolla. Energiakulutuksia ja tehontarpeita laskettaessa huomioitiin, että korttelissa on 5 kerrostaloa ja 2 toimistorakennusta. Simulointien tuloksena saatiin korttelille kokonaisenergiakulutus ja lämpö-, jäähdytys-, ja sähköenergiakulutukset sekä tehontarpeet.

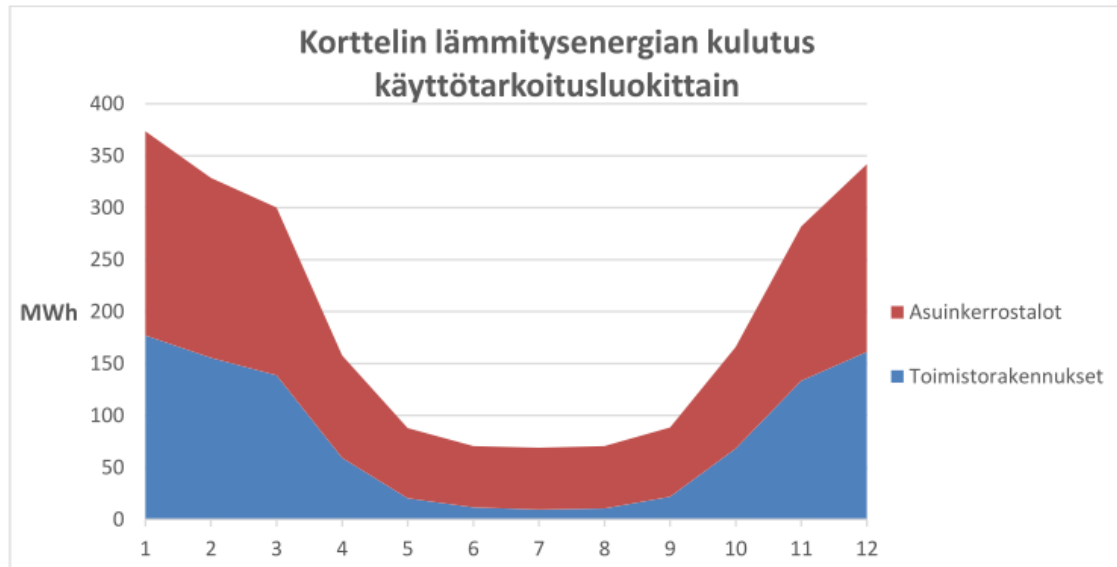
Kuvassa 72 on esitetty korttelin vuotuinen kokonaisenergiakulutus kuukausittain. Kuvasta nähdään, että jäähdytysenergian kulutus asettuu kesäkuukausille ja sähkön kulutus on lähes tasaista ympäri vuoden.



Kuva 72. Korttelin vuotuinen, kuukausittainen kokonaisenergiakulutus.

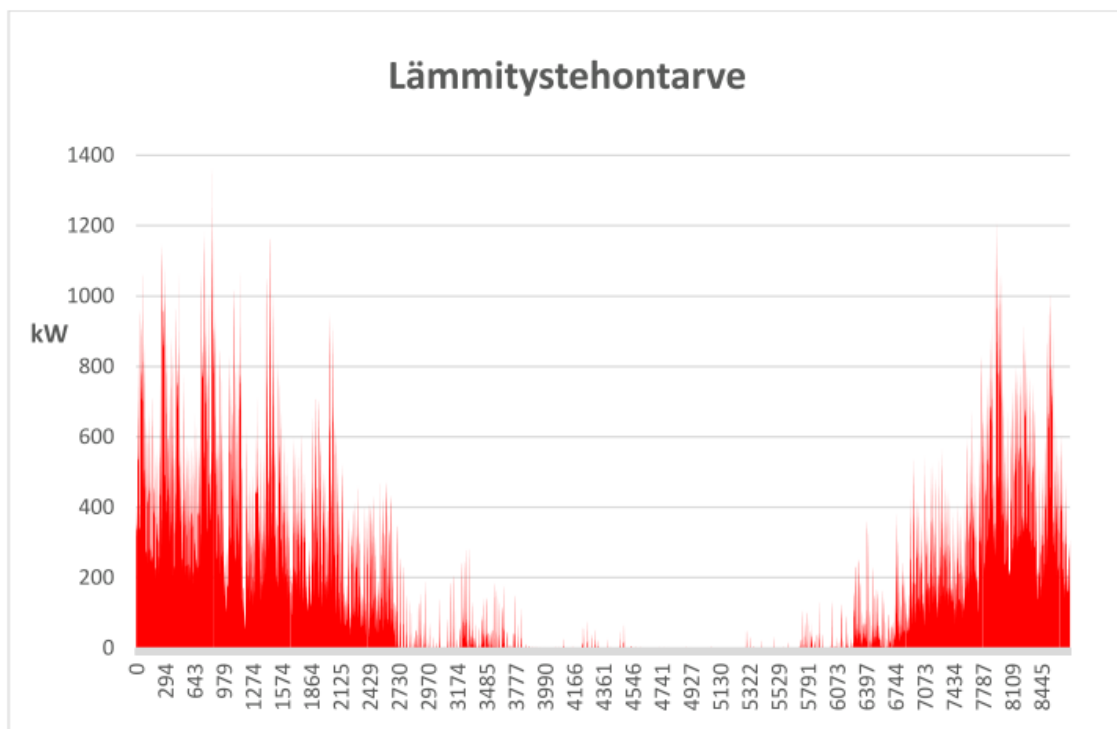
4.2.3.1 Lämmitysenergia ja -teho

Kuvassa 73 on esitetty korttelin lämmitysenergian kulutus käyttötarkoitukseluokittain. Kuten kuvasta nähdään, asuinkerrostalojen osuus lämmitysenergian kulutuksesta on läpi vuoden suurempi johtuen suuremmasta kokonaiskerrosalasta kuin toimistorakennuksilla.



Kuva 73. Korttelin lämmitysenergian kulutus käyttötarkoitukseluokittain.

Alla olevassa kuvassa on esitetty koko korttelin kokonaislämmitystehontarve vuoden ajalta. Korttelin lämmityksen huipputeho saavutetaan 6. helmikuuta ja se on noin 1360 kW.



Kuva 74. Korttelin vuotuinen, tunnittainen lämmitystehontarve.

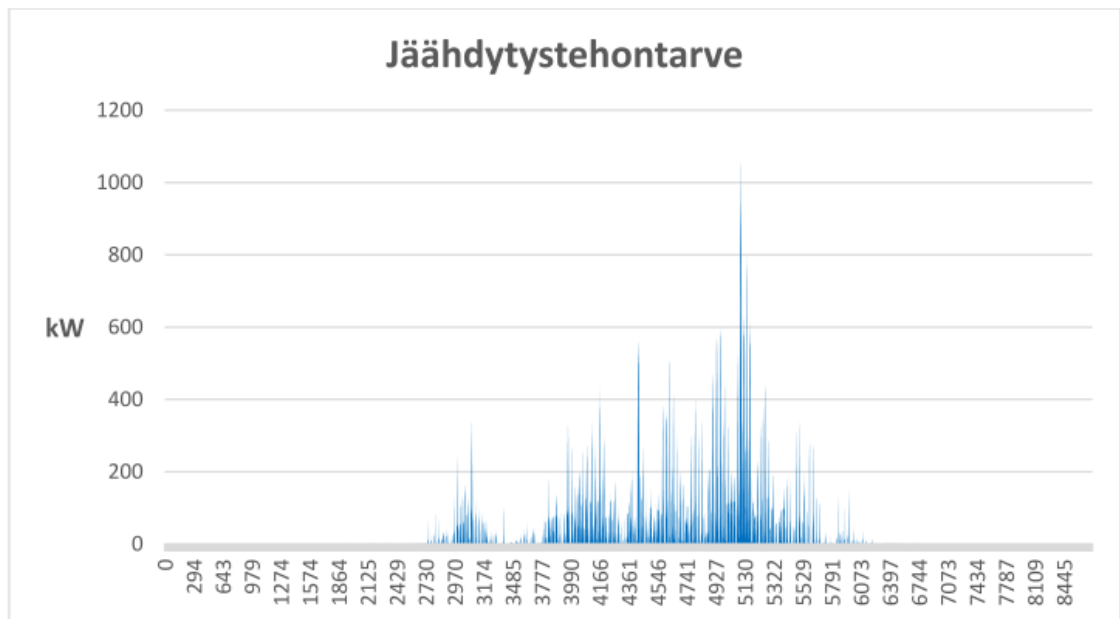
4.2.3.2 Jäähdytysenergia ja -teho

Kuvassa 75 on korttelin jäähdytysenergian kulutus käyttötarkoitukseluokittain. Kuvasta nähdään, että toimistorakennusten jäähdytysenergian kulutus on paljon suurempaa kuin asuinkerrostalojen, vaikka kokonaiskerrosala onkin pienempi. Toimistorakennusten kesäajan huonelämpötilavaatimukset ovat asuinkerrostalojen vaatimuksia tiukemmat. Suomen rakentamismääräyskokoelman energiatehokkuutta käsittelevän osan D3 kesäajan huonelämpötilojen laskentaoppaan (2012) mukaisesti toimistorakennusten kesäajan huonelämpötilat eivät saa ylittää 25 °C yli 150 astetunnilla. Kesäajaksi lasketaan 1. kesäkuuta ja 31. elokuuta välinen aika. Lämpötilaraja asuinkerrostaloilla on 27 °C.



Kuva 75. Korttelin jäähdytysenergian kulutus käyttötarkoitukseluokittain.

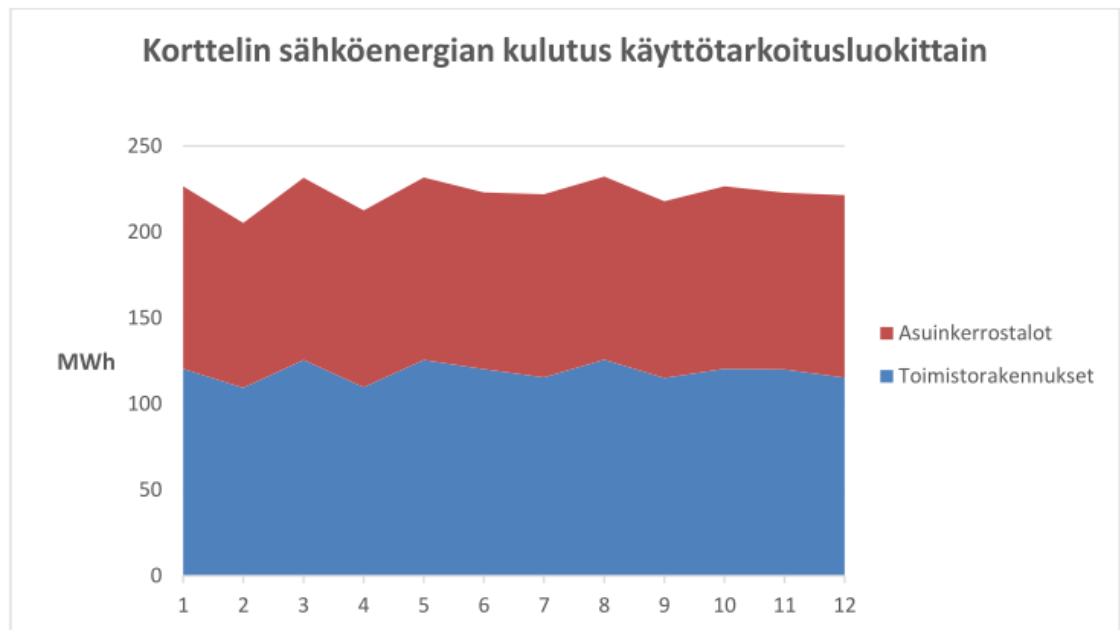
Kuvassa 76 on esitetty vuoden tunnittaiset jäähdytystehontarpeet. Suurin jäähdytysteho tarvitaan 1. elokuuta ja se on noin 1060 kW.



Kuva 76. Korttelin vuotuinen, tunnittainen jäähdytystehontarve.

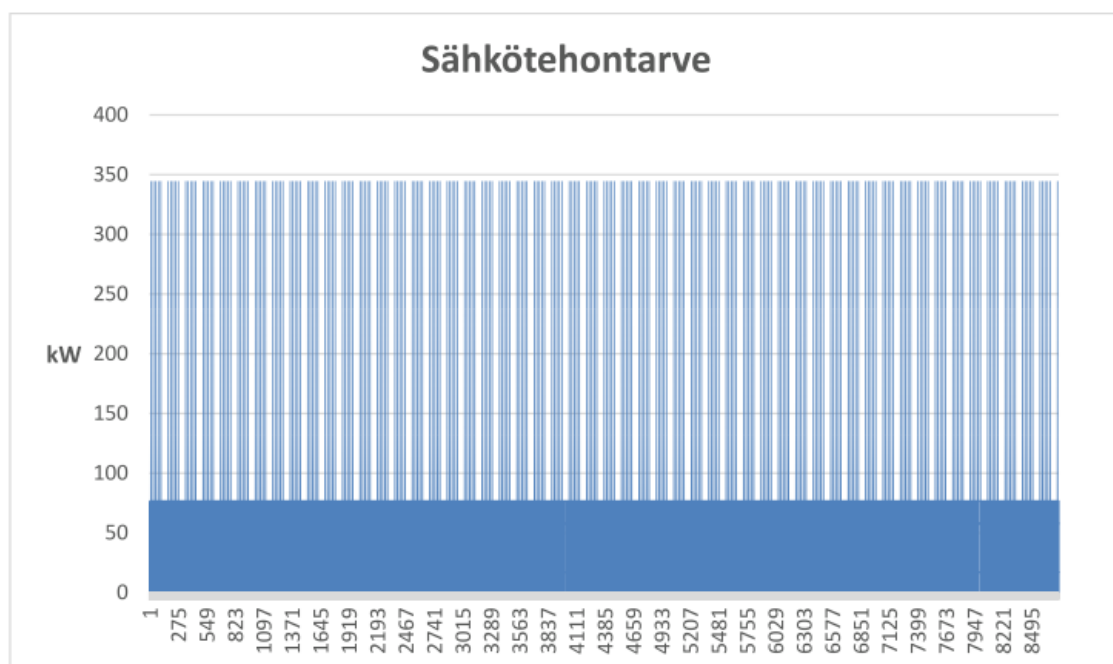
4.2.3.3 Sähköenergia ja –teho

Alla olevassa kuvassa on korttelin sähköenergian kulutus käyttötarkoitukseluokittain. Sähköenergian kulutus on läpi vuoden melko tasaista, pienin kulutus osuu taas helmikuulle, mikä johtuu sen vuorokausien vähäisyydestä.



Kuva 77. Korttelin sähköenergian kulutus käyttötarkoitukseluokittain.

RakMK D3-määräysten mukainen toimistorakennuksen käyttöaika on arkipäivisin klo 7-18 välillä, mistä johtuu sähkötehon sijoittuminen tälle aikavälille (kuva 78). Korttelin huippusähköteho on noin 344,5 kW ja se saavutetaan aina arkipäivisin klo 8-18 välillä.



Kuva 78. Korttelin vuotuinen, tunnittainen sähkötöhtontarve.

4.2.4 Energiatuotannon hiilidioksidipäästöt

Energiantuotannon hiilidioksidipäästöt on saatu Tampereen Sähkölaitoksen sekä Motivan sivuilta. Nämä CO₂-päästökertoimet ovat laskettu muutamien viime vuosien keskiarvona, eivätkä vastaa absoluuttista totuutta, mutta päästökertoimien avulla on helpompi vertailla kunkin energiantuotantomuodon hiilidioksidipäästöjä sekä kulutusmuutosten vaikutuksia päästöihin.

Lämpöpumput tarvitsevat toimiakseen sähköä. Jo aiemmin tässä työssä mainittiin, että maalämpöpumpun tehokkuutta kuvataan lämpökertoimella, joka kertoo pumppujen tuotetun lämmön suhteessa niiden kuluttamaan sähköön. Maalämpöpumpulla voidaan säästää 60-70 % lämmitysenergiakustannuksissa verrattuna suoraan sähkölämmitykseen. Sähköntuotannon CO₂-päästökerroin Suomessa on 181 kg CO₂/MWh, joten maalämpöpumppujen CO₂-päästökerroin on noin 55-70 kg CO₂/MWh. (Motiva 2017d.)

Kaukolämpö tuotetaan joko lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksissa tai lämpökeskuksissa, minkä lisäksi voidaan hyödyntää myös teollisuuden ylijäämälämpöä ja esimerkiksi kaatopaikkojen biokaasujen poltosta aiheutuvaa lämpöä. Yhteistuotantolaitokset ovat näistä energiatehokkain vaihtoehto. Kaukolämmön erillistuotannon hiilidioksidipäästöt riippuvat hyvin paljon tuotantotavasta, eli mikäli lämpö tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, päästöt ovat korkeat, ja mikäli taas lämpö tuotetaan teollisuuden sivutuotteena tai uusiutuvilla energianlähteillä, päästöt ovat matalat. (Motiva 2017d.) Kaukolämmön CO₂-päästökerroin on Tampereella 186 kg CO₂/MWh (Tampereen Sähkölaitos b). Tampereen kaukolämmön hiilidioksidipäästöt putoavat oleellisesti Naistenlahti 2-voimalaitoksen uusimisen jälkeen, mutta tässä työssä laskelmat tehdään tämänhetkisten päästötietojen perusteella.

Tampereen kaukojäähdytys on päästötöntä, koska jäähdytyksessä hyödynnetään järvivesivapaa jäähdytystä, ja priimaus sekä jakelu toteutetaan pohjoismaisella vesisähköllä.

4.3 Hiedanrannan energiantuotanto

Työssä tutkitaan Hiedanrannan alueelle elinkaarikustannuksiltaan kannattavinta lämmitys- ja jäähdytysratkaisua. Energiantuotantovaihtoehtoiksi on valittu kaukolämpö ja kaukojäähdytys, kaukolämpö ja koneellinen jäähdytys, maalämpö ja maaviileä sekä kaukolämpö ja vesistöjäähdytys. Elinkaarikustannusvertailu tehdään 25 vuoden ajalla.

Kaikkien laitteiden tekniseksi käyttöiäksi on tässä työssä määriteltä 25 vuotta. Vertailussa käytetään nykyarvomenetelmää, jossa tulevaisuuden kustannukset siirretään nykyhetkeen korkojen avulla. Laskentakorkona on käytetty 3 % ja sähkön hinnan vuotuiseksi nousuksi on arvioitu 2 %. Kaikki tarjoukset ovat budjettitarjouksia, ja kaikki kustannukset on ilmoitettu ilman arvonlisäveroa (alv 0 %).

Tässä osassa tutkitaan lisäksi aurinkosähkön hyödyntämismahdollisuuksia Hiedanrannan alueella. Aurinkosähköä ei huomioida eri energiantuotantovaihtoehtojen mukana, vaan tutkitaan erillisenä osiona.

4.3.1 Vaihtoehto 1: Kaukolämpö ja kaukojäähdytys

Ensimmäisenä energiantuotantovaihtoehtona on kaukolämpö ja kaukojäähdytys. Kaukolämpöverkosto kulkee Hiedanrannan alueella, joten rakennuksen liittäminen kaukolämpöön ei tuota ongelmia. Kaukojäähdytysverkosto ei ulotu Hiedanrannan alueelle diplomaattien kirjoitushetkellä. (Tampereen Sähkölaitos a.)

Kaukolämmön investointikustannus muodostuu liittymämaksusta, johtomaksusta ja lämmönjakokeskuksen kustannuksista. Johtomaksun hinta määräytyy liittymisjohdon pituuden mukaan, mitattuna kaukolämmön liittymispisteestä asiakkaan lämmönjakohuoneeseen asti lyhintä reittiä pitkin. Kaukojäähdytyksen investointikustannus muodostuu liittymämaksusta sekä kylmäkeskuksen kustannuksista. Laskelmissa on huomioitu vuosittaiset huoltokustannukset.

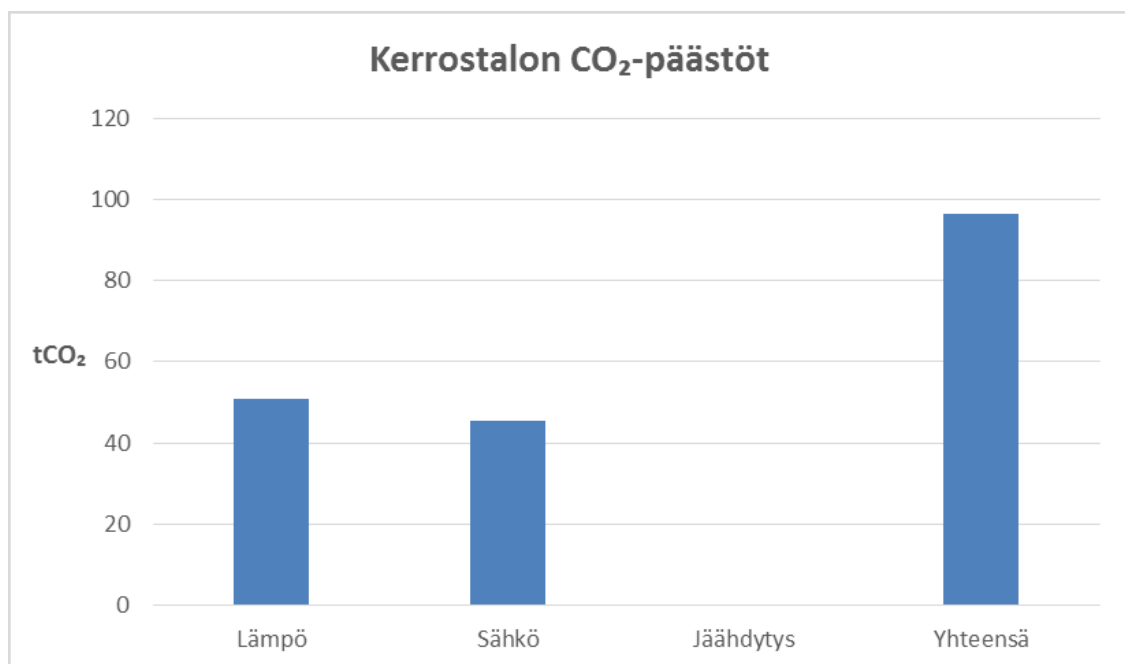
Kaukolämmön arvonlisäveroton hinta on tarkasteluhetkellä saadun tarjouksen mukaan 50 €/MWh ja kaukojäähdytyksen arvonlisäveroton hinta on 27 €/MWh.

Kerrostalo

Tampereen Sähkölaitokselta saadun budjettitarjouksen mukaan kaukolämmön liittymismaksu kerrostalotapauksessa on 9100 euroa ja johtomaksu 18 000 euroa, minkä lisäksi tulee perusmaksu 3924 €/vuosi. Kaukojäähdytyksen liittymismaksu saadun tarjouksen perusteella on 26 000 euroa, minkä lisäksi tulee perusmaksu 3348 €/vuosi.

Danfossilta saadun budjettitarjouksen mukaan lämmönjakokeskuksen kustannus on 11 000 euroa ja kylmäkeskuksen kustannus on 12 500 euroa.

Alla olevassa kuvassa on esitetty vaihtoehdon 1 hiilidioksidipäästöt kerrostalotapauksessa. Koska Tampereen kaukojäähdytys on päästötöntä, ei jäähdytyksestä aiheudu tässä tapauksessa hiilidioksidipäästöjä.



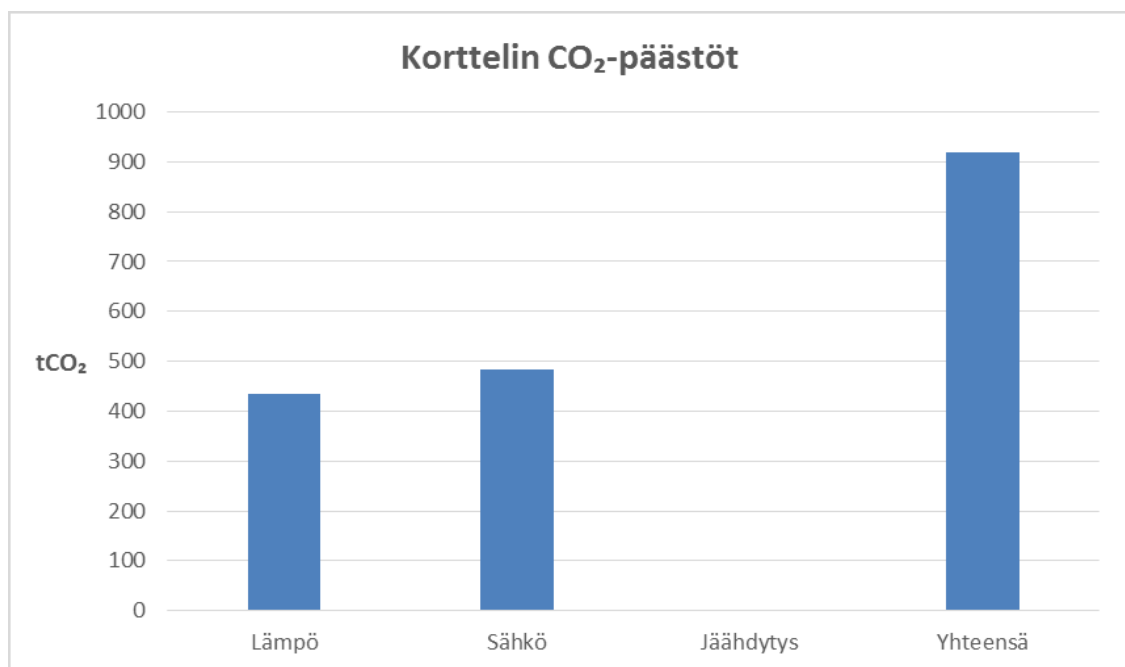
Kuva 79. Vaihtoehdon 1 hiilidioksidipäästöt kerrostalotapauksessa.

Kortteli

Seuraavaksi on esitettyä korttelinäkökulmasta vaihtoehto 1. Tampereen Sähkölaitokselta saadun budjettitarjouksen mukaan kaukolämmön liittymismaksu korttelitapauksessa on 92 620 euroa ja johtomaksu 126 000 euroa, minkä lisäksi tulee perusmaksu 38 844 €/vuosi. Kaukojäähdytyksen liittymismaksu saadun tarjouksen mukaan on 128 410 euroa, minkä lisäksi tulee perusmaksu 31 740 €/vuosi.

Danfossilta saadun budjettitarjouksen mukaisesti lämmönjakokeskuksien hinta yhteensä on 91 000 euroa ja kylmäkeskuksien hinta yhteensä on 136 500 euroa.

Kuvassa 80 on esitetty vaihtoehdon 1 hiilidioksidipäästöt korttelitapauksessa. Myöskään korttelitapauksessa jäähdytyksestä ei aiheudu hiilidioksidipäästöjä.



Kuva 80. Vaihtoehdon 1 hiilidioksidipäästöt korttelitapauksessa.

4.3.2 Vaihtoehto 2: Kaukolämpö ja koneellinen jäähdytys

Toisena energiantuotantovaihtoehtona on kaukolämpö ja koneellinen jäähdytys. Molemmista tutkimustapauksissa vedenjäähdyttimet on varustettu vapaajäähdytyksellä sekä taajuusmuuttajaohjatulla kompressorilla. Laskelmissa on huomioitu vuosittaiset huoltokustannukset.

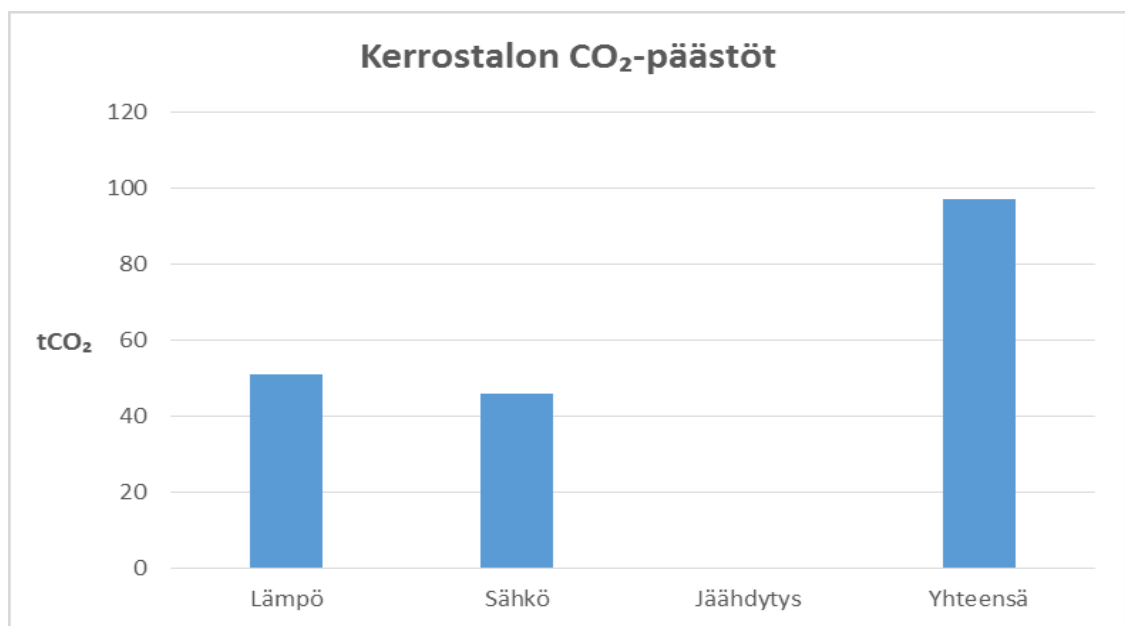
Jotta lauhdelämmön kierrättäminen lämmitykseen olisi kannattavaa, tulisi jäähdytystä olla tasaisesti ympäri vuoden. Kummassakin tutkimustapauksessa jäähdytystä on pääasiassa vain kesäaikaan, joten tässä työssä lauhdelämmön kierrättämistä ei käsitellä.

Kerrostalo

Budjettitarjous on saatu Chiller Oy:ltä ja se sisältää asennuksen, käynnistykset, viritykset, dokumentoinnit ja käytönopastuksen. Budjettitarjoukseen ei sisälly nostoja ja haalauksia, LVI-tekniisiä putkitustöitä eikä sähköitä. Vedenjäähdyttimen kokonaiskustannus on 47 000 euroa (alv 0 %).

Laskennassa on käytetty sähkön hintana 90 €/MWh. Hinta sisältää energian, siirron ja sähköveron. Hintatiedot on saatu Tampereen Sähkölaitoksen sivuilta. Jäähdytyskoneen kylmäkertoimeksi saatiin 3,7.

Kuvassa 81 on vaihtoehdon 2 hiilidioksidipäästöt kerrostalotapauksessa.



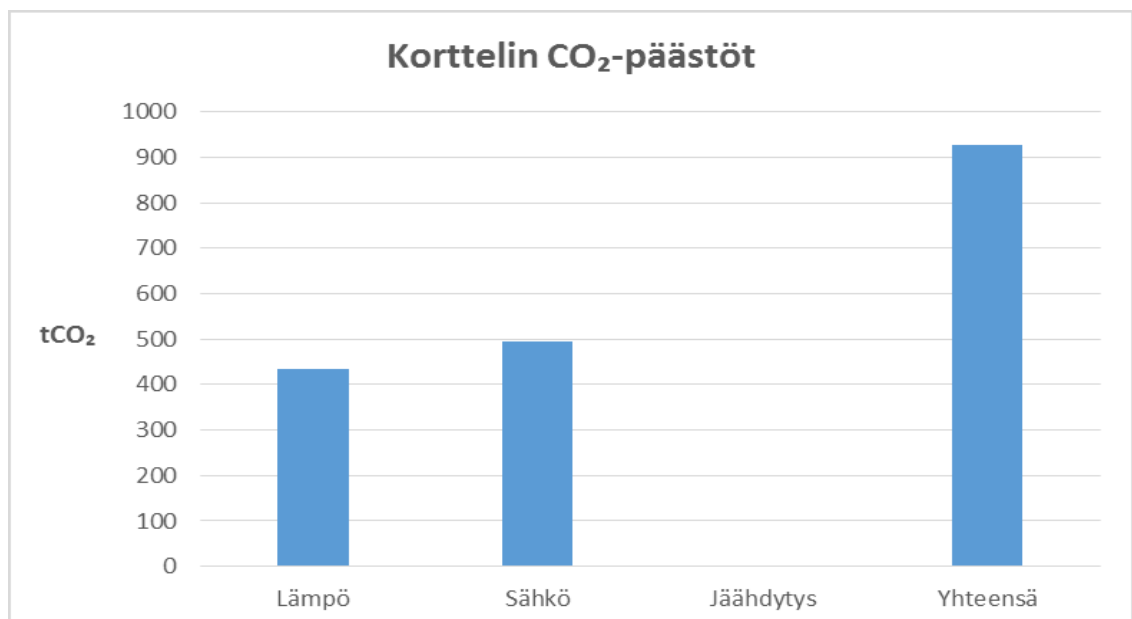
Kuva 81. Vaihtoehdon 2 hiilidioksidipäästöt kerrostalotapauksessa.

Kortteli

Myös korttelitapaukseen on saatu Chiller Oy:ltä budjettitarjous, joka sisältää asennuksen, käynnistykset, viritykset, dokumentoinnit ja käytönopastuksen. Budjettitarjoukseen ei sisälly nostoja ja haalauksia, LVI-teknisiä putkitustöitä eikä sähköitä. Vedenjäähdyttimien kokonaiskustannus on 434 500 euroa (alv 0 %).

Sähkön hintana on käytetty 90 €/MWh. Kerrostaloihin asennettavien jäähdytyskoneiden kylmäkertoimiksi saatiin 3,7 ja toimistorakennuksiin asennettavien jäähdytyskoneiden kylmäkertoimiksi 4.

Kuvassa 82 on vaihtoehdon 2 hiilidioksidipäästöt korttelitapauksessa.

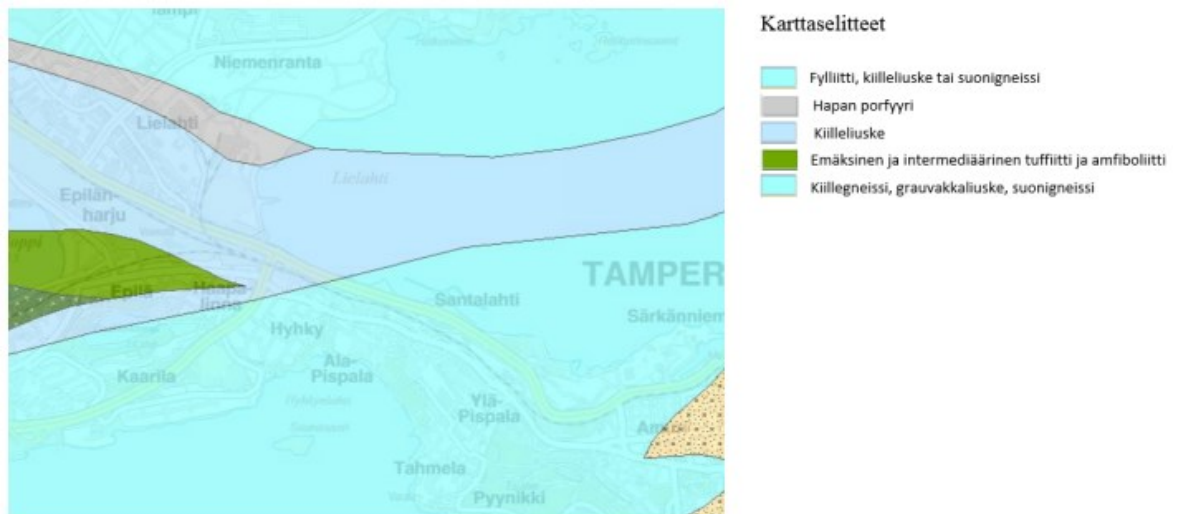


Kuva 82. Vaihtoehdon 2 hiilidioksidipäästöt korttelitapauksessa.

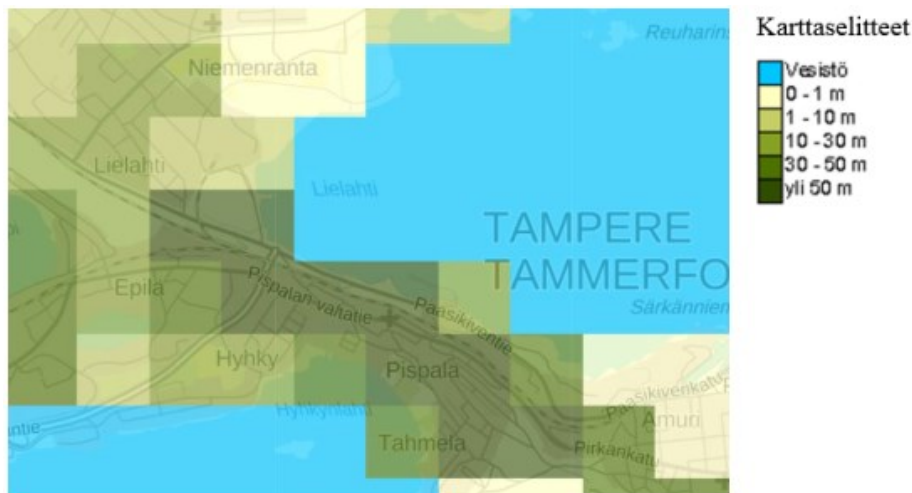
4.3.3 Vaihtoehto 3: Maalämpö ja maaviileä

Kolmantena vaihtoehtona on maalämpö ja maaviileä. Molemmissa tutkimustapauksissa jäädytystarpeen perusteella tehty mitoitus riittää kattamaan myös kaiken lämmitystarpeen, joten kaukolämpöä ei tarvita tällöin lainkaan. Laskelmissa on huomioitu vuosittaiset huoltokustannukset.

Kallioperäkartan (kuva 83) mukaan Hiedanrannan alueen kallioperä on pääasiassa kiillegneissisiä ja kiilleliusketta, joiden lämmönjohtavuus on 2,5-3,0 W/(mK) (GTK a, GTK 2015). Kallioperää peittävän irtomaan paksuus on maalämpökaivojen sallimalla alueella hieman paikasta riippuen 0-30 metriä kuvan 84 mukaisesti (GTK b).



Kuva 83. Hiedanrannan alueen kallioperä (GTK a).



Kuva 84. Hiedanrannan alueen maanpeitepaksuus (GTK b).

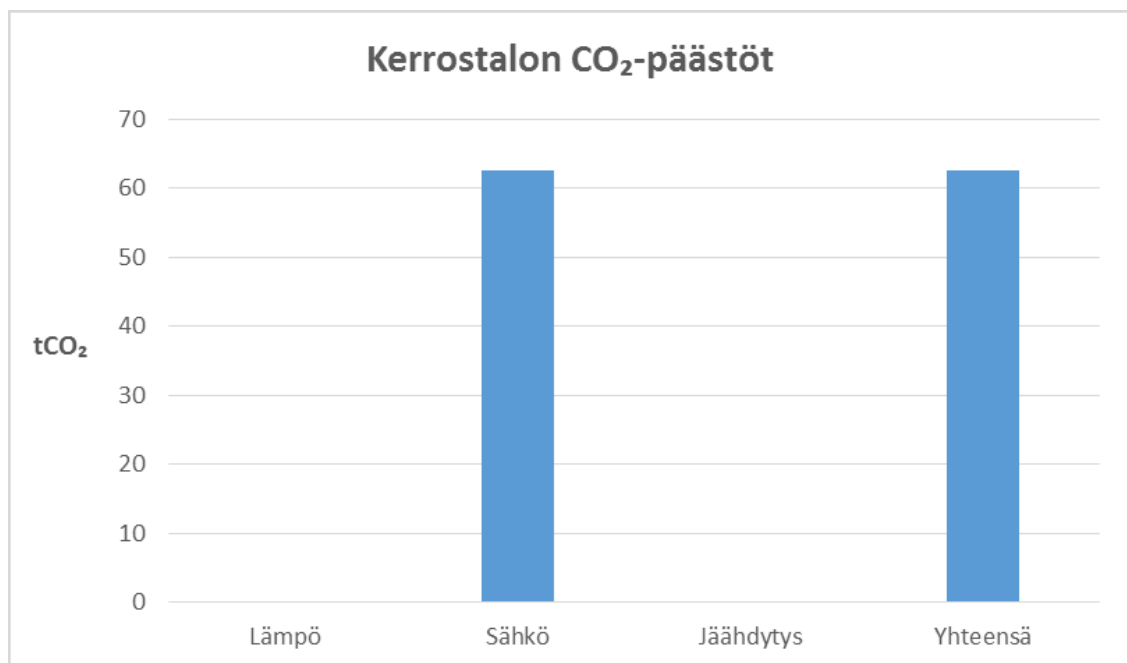
Kerrostalo

Kerrostalo kohteeseen on saatu tarjous Tom Allen Senera Oy:ltä. Tom Allen Seneran tarjous maalämpöjärjestelmästä sisältää maalämpöpumput, ohjaus- ja taloautomaatiojärjestelmän, lämpökaivot ja lämmönkeruuputket sekä sähköverkkoon liittyvät sähköasennus-

työt. Tämän lisäksi tarjoukseen kuuluu muita maalämpöjärjestelmän asentamiseen liittyviä töitä, kuten piha- ja maansiirtotyöt sekä järjestelmän säätö ja käyttökoulutus. Maalämpöjärjestelmän kokonaiskustannus on 136 804 euroa (alv 0 %). Järjestelmän vaatima lämpökaivojen syvyys on yhteensä 2240 metriä eli 300 metrin kaivoja tarvitaan noin 7 kappaletta.

Laskennassa on käytetty sähkön hintana 90 €/MWh. Hinta sisältää energian, siirron ja sähköveron. Hintatiedot on saatu Tampereen Sähkölaitoksen sivuilta. Lämpöpumppujen lämpökertoimena on laskennassa käytetty arvoa 3.

Alla olevassa kuvassa on esitetty vaihtoehdon 3 hiilidioksidipäästöt kerrostalotapauksessa.



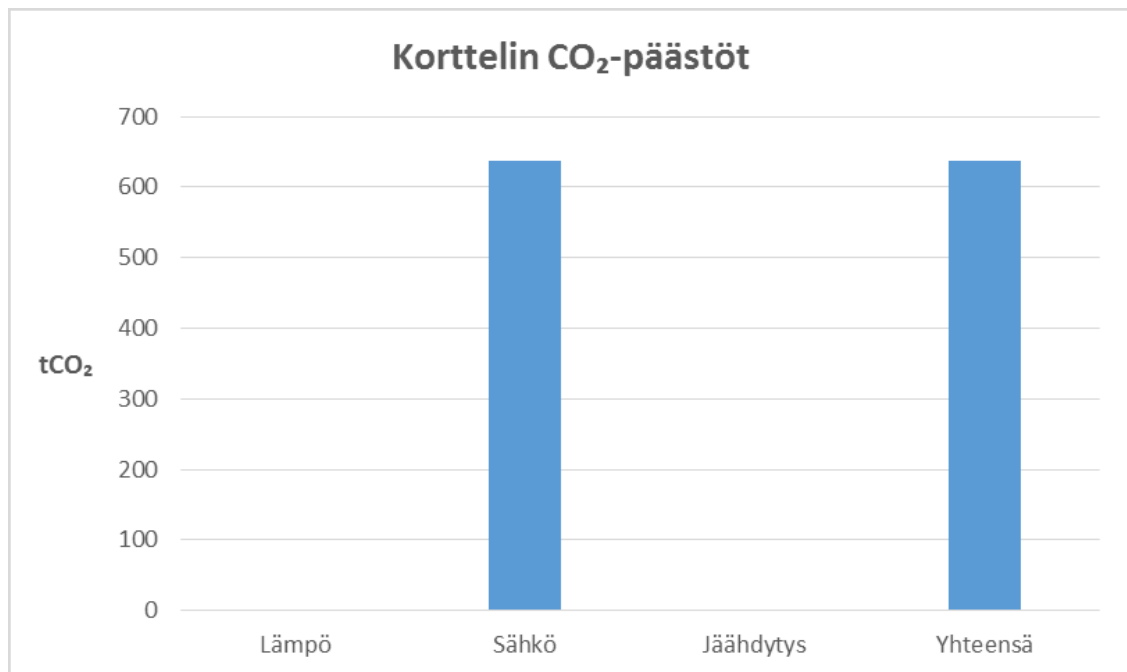
Kuva 85. Vaihtoehdon 3 hiilidioksidipäästöt kerrostalotapauksessa.

Kortteli

Korttelitapaukseen saatiin tarjous ST1:ltä. Tarjous maalämpöjärjestelmästä sisältää porakaivokentän, lämpöpumput, tarvittavat putkityöt, mittaroinnin ja ohjausautomaatiikan. Maalämpöjärjestelmän kokonaiskustannus on 1 539 334 euroa (alv 0 %). Lämpökaivoja tarvitaan yhteensä 15 km ja syvyyttä 300-600 metriä kaivoa kohden tilankäytöstä riippuen.

Sähkön hintana laskennassa on käytetty 90 €/MWh. Lämpöpumppujen lämpökertoimena on laskennassa käytetty arvoa 3.

Kuvassa 86 on esitetty vaihtoehdon 3 hiilidioksidipäästöt korttelitapauksessa.

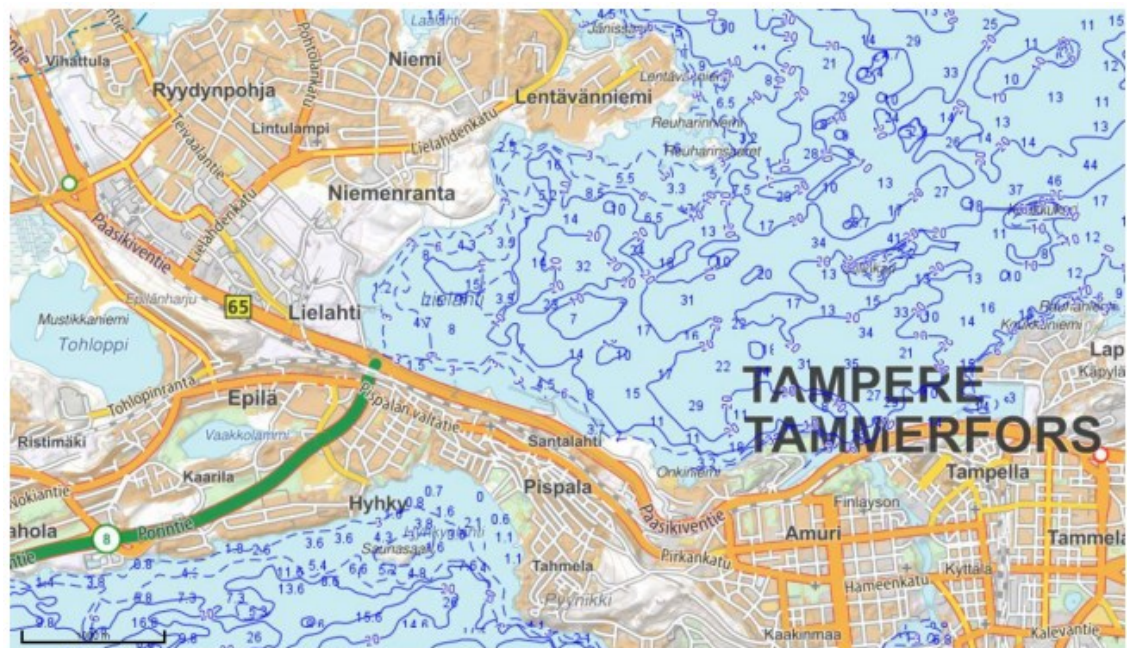


Kuva 86. Vaihtoehdon 3 hiilidioksidipäästöt korttelitapauksessa.

4.3.4 Vaihtoehto 4: Kaukolämpö ja vesistöjäähdytys

Neljäntenä energiantuotantovaihtoehtona on kaukolämpö ja vesistöjäähdytys. Tätä energiantuotantovaihtoehtoa on tutkittu ainoastaan korttelitapauksessa, koska kerrostalotapauksessa lämpöä ja jäähdytystä saataisiin Uponorin vesistölämpöratkaisulla moninkertainen määrä kulutukseen verrattuna.

Kuvassa 87 on Näsijärven syvyyskäyrät Hiedanrannan edustalla. Näsijärvi sopii hyvin vesistölämmönlähteeksi, koska jo 350 metrin päässä rannasta järven syvyys on 14 metriä.

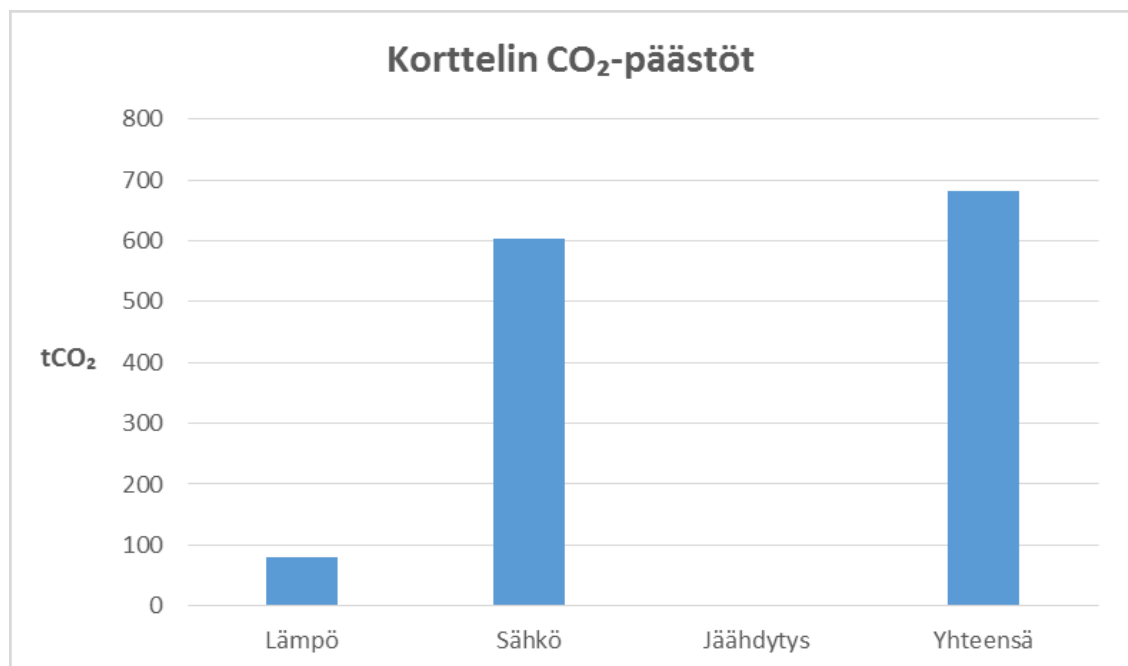


Kuva 87. Näsijärven syvyyskäyrät Hiedanrannan edustalla (Metsähallitus).

Budjettitarjous vesistölämpöön on saatu Uponorilta, ja tarjous sisältää lämmönvaihdinmateriaalit, lämpöpumppukeskuksen asennettuna, yhdysputket sekä vesistöasennuksen. Asennukset eivät sisällä raivaamista, ruoppaamista, louhintaa, lupia eikä pohjatutkimuksia. Vesistölämpöratkaisun kokonaiskustannus on 1 553 000 (alv 0 %). Vesistöputkea tarvitaan 700 metriä ja yhdysputkia 240 metriä. Laskelmissa on huomioitu vuosittaiset huoltokustannukset.

Vesistölämpöratkaisulla voidaan kattaa koko korttelin vaatima jäähdytysenergia, minkä lisäksi se tuottaa vuosittain noin 1912 MWh lämpöä. Loput tarvittavasta lämmöstä tuotetaan kaukolämmöllä. Vesistölämpöpumppujen hyötysuhteena käytetään arvoa 3,2.

Kuvassa 88 on esitetty vaihtoehdon 4 hiilidioksidipäästöt korttelitapauksessa.

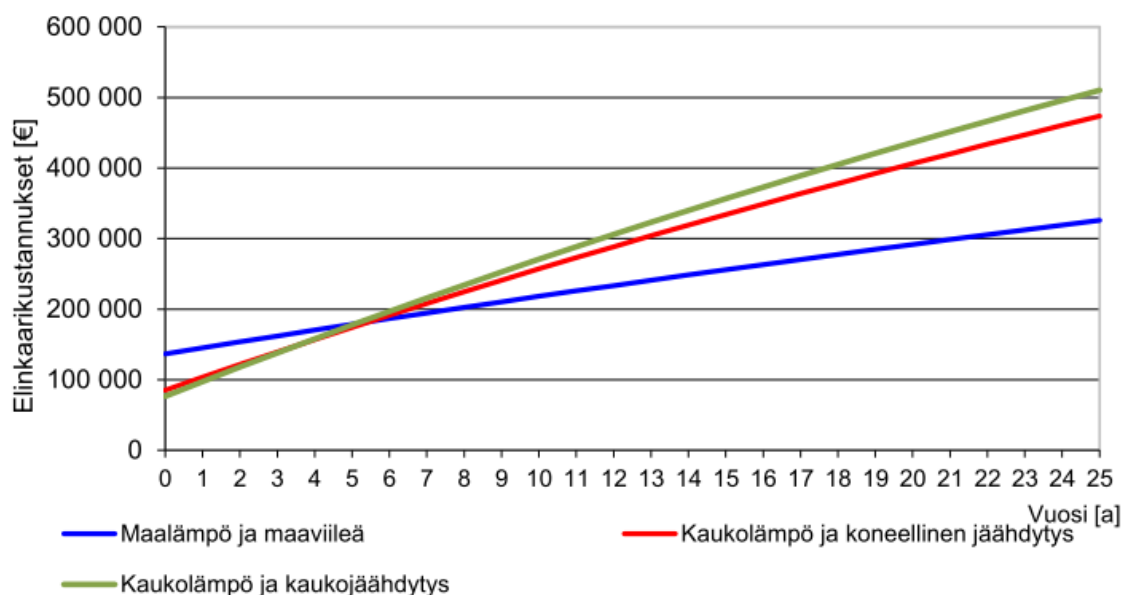


Kuva 88. Vaihtoehdon 4 hiilidioksidipäästöt korttelitapauksessa.

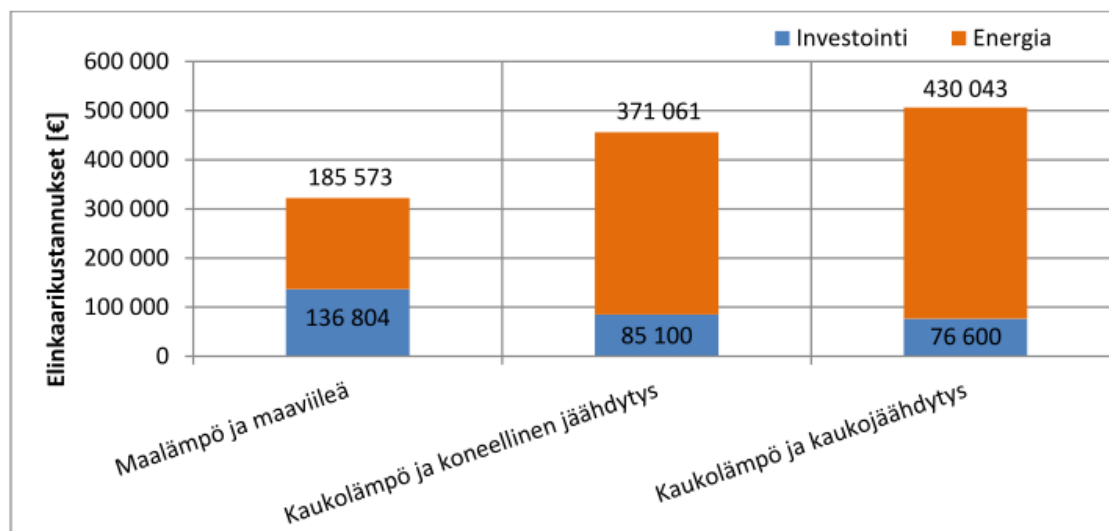
4.3.5 Energiantuotantotarkastelun yhteenveto

Tässä työssä vertaillaan eri energiantuotantovaihtoehtoja elinkaarikustannusten sekä hiilidioksidipäästöjen kannalta. Elinkaarikustannusvertailu toteutetaan 25 vuoden ajalla.

Kuvassa 89 on esitetty kerrostalotapauksen energiantuotantovaihtoehtojen takaisinmaksuaikavertailu, sekä kuvassa 90 elinkaarikustannusten nykyarvon jakautuminen investointi- ja energiakustannuksiin.



Kuva 89. Energiantuotantovaihtoehtojen elinkaarikustannusten kertyminen 25 vuoden laskenta-ajalla kerrostalotapauksessa.

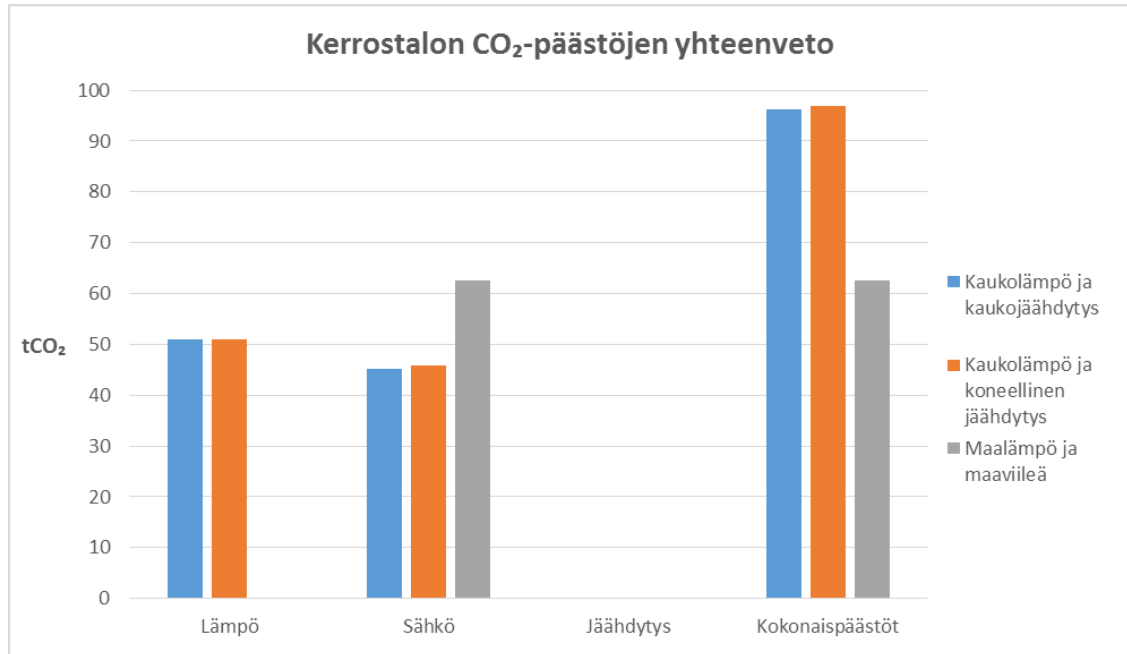


Kuva 90. Elinkaarikustannusten nykyarvon jakautuminen investointi- ja energiakustannuksiin kerrostalotapauksessa.

Elinkaarikustannukset ovat alkuvuosina suuremmat maalämmöllä ja maaviileällä verrattuna muihin vaihtoehtoihin johtuen suuremmasta alkuinvestoinnista. Kuvasta 89 nähdään, että maalämpö ja maaviileä saavuttaa samat kokonaiskustannukset muiden energiantuotantovaihtoehtojen kanssa kuudennen vuoden aikana. Tästä eteenpäin maalämpö ja maaviileä on energiantuotantovaihtoehtoista edullisin.

Kokonaisuudessaan kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen elinkaarikustannukset ovat noin 184 266 euroa (36,4 %) suuremmat sekä kaukolämmön ja koneellisen jäähdytyksen noin 133 784 euroa (29,3 %) suuremmat kuin maalämmön ja maaviileän koko 25 vuoden elinkaaren ajalta.

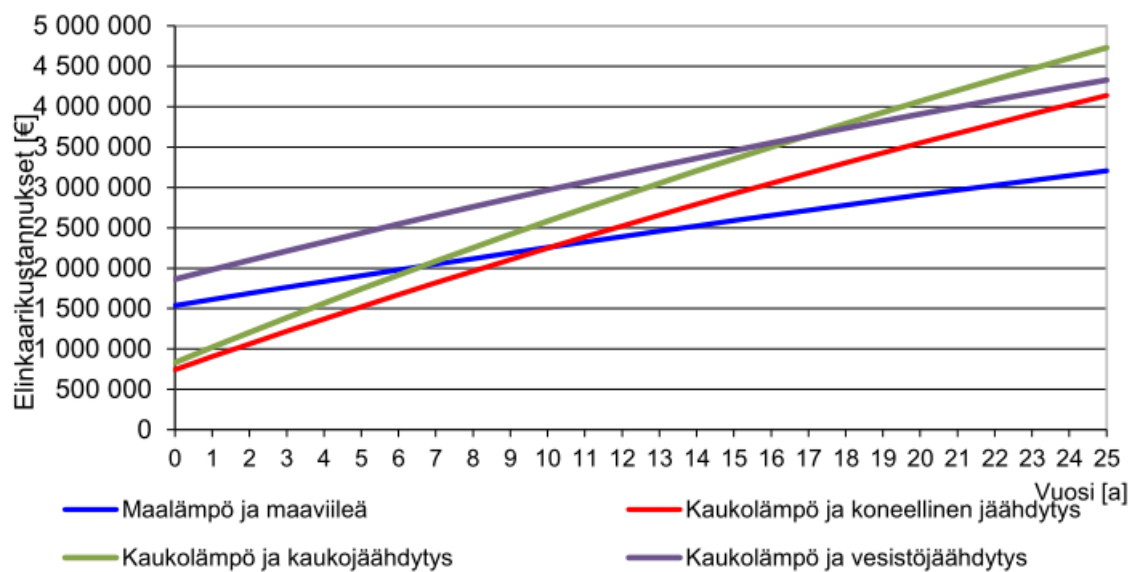
Kuvassa 91 on esitetty kerrostalotapauksen hiilidioksidipäästöt eri energiantuotantovaihtoehtoissa. Kuvassa on erikseen esitetty lämmön-, sähkön- ja jäähdytysentuotantojen päästöt sekä lopuksi kokonaispäästöt.



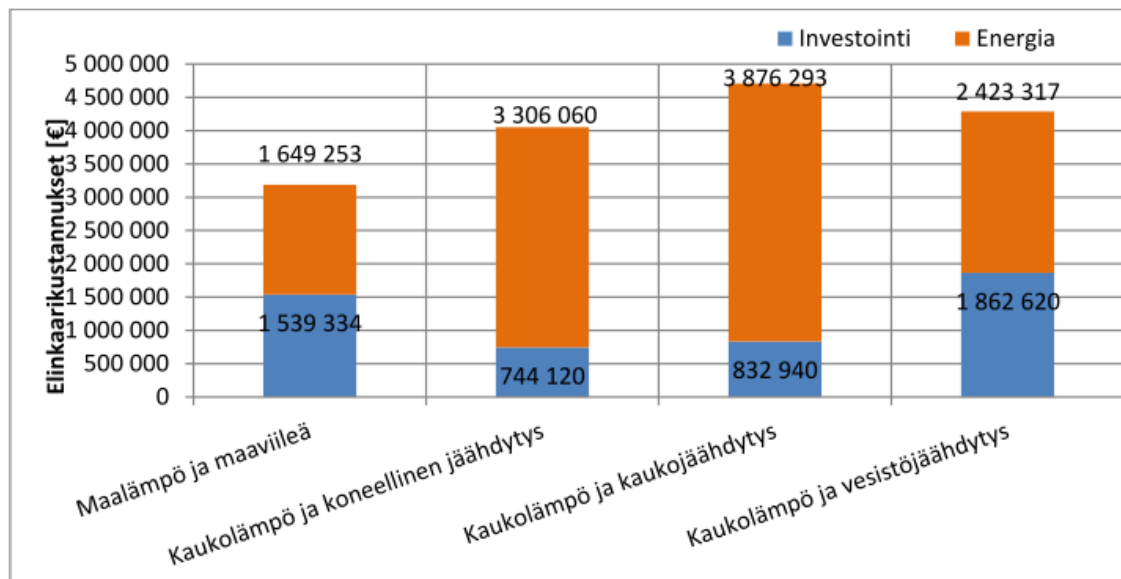
Kuva 91. Energiantuotantovaihtoehtojen hiilidioksidipäästöt kerrostalotapauksessa.

Kuvasta nähdään, että maalämmön ja maaviileän kokonaispäästöt ovat selkeästi pienimmät eri vaihtoehtoista.

Kuvassa 92 on esitetty korttelitapauksen energiantuotantovaihtoehtojen takaisinmaksuajavertailu, sekä kuvassa 93 elinkaarikustannusten nykyarvon jakautuminen investointi- ja energiakustannuksiin.



Kuva 92. Energiantuotantovaihtoehtojen elinkaarikustannusten kertyminen 25 vuoden laskenta-ajalla korttelitapauksessa.

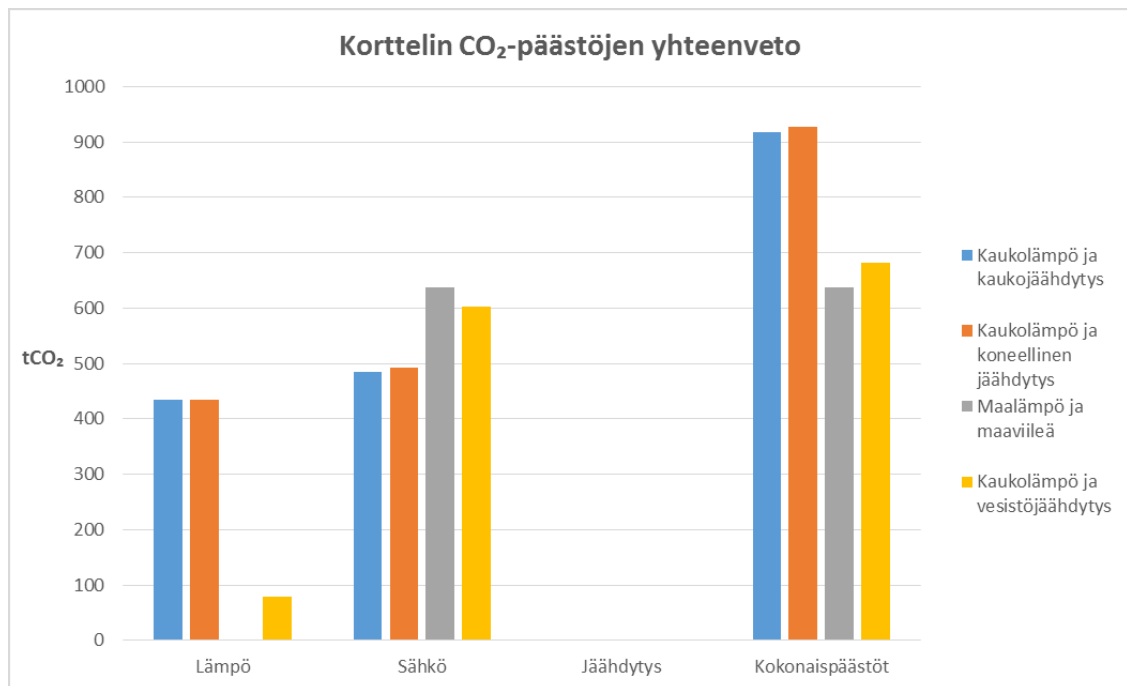


Kuva 93. Elinkaarikustannusten nykyarvon jakautuminen investointi- ja energiakustannuksiin korttelitapauksessa.

Korttelitapauksessa kaukolämmön ja vesistöjäähdytyksen sekä maalämmön ja maaviileän elinkaarikustannukset ovat alkuvuosina suurimmat kaikista vaihtoehdoista, johtuen suuremmista alkuinvestoinneista. Kuvasta 92 nähdään, että maalämpö ja maaviileä saavuttaa samat kokonaiskustannukset kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen kanssa seitsemän vuoden aikana ja kaukolämmön ja koneellisen jäähdytyksen kanssa 11. vuoden aikana, ollen tästä eteenpäin energiantuotantovaihtoehdoista edullisin.

Kokonaisuudessaan kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen elinkaarikustannukset ovat noin 1 520 646 euroa (32,3 %) suuremmat sekä kaukolämmön ja koneellisen jäähdytyksen noin 861 593 euroa (21,3 %) suuremmat kuin maalämmön ja maaviileän koko 25 vuoden elinkaaren ajalta.

Kuvassa 94 on esitetty korttelitapauksen hiilidioksidipäästöt eri energiantuotantovaihtoehdoissa. Kuvassa on erikseen esitetty lämmön-, sähkön- ja jäähdytysentuotantojen päästöt sekä lopuksi kokonaispäästöt.



Kuva 94. Energiantuotantovaihtoehtojen hiilidioksidipäästöt korttelitapauksessa.

Kuvasta nähdään, että myös korttelitapauksessa maalämmön ja maaviileän kokonaispäästöt ovat pienimmät eri vaihtoehdoista.

4.3.6 Aurinkosähkön hyödyntäminen

Työssä tutkitaan aurinkosähköjärjestelmän taloudellista kannattavuutta Hiedanrannan alueella. Tutkituille järjestelmille tehdään hankesuunnitelmatason energialaskelmat, kustannuslaskelmat sekä elinkaarikustannusvertailu 25 vuoden ajalle.

Hiedanranta soveltuu hyvin aurinkosähköjärjestelmän asennukseen. Kerrostalon katolle on asennettavissa 52 kW_p:n aurinkosähkökapasiteetti ja toimistorakennuksen katolle 60 kW_p:n aurinkosähkökapasiteetti. Elinkaarikustannuslaskennan tulosten perusteella kiinteistön omistajan on mahdollista tehdä investointipäätöksiä uusiutuvan energian tuotantoa koskien.

Aurinkosähköjärjestelmään investoimista voi perustella jo taloudellisen takaisinmaksuajan perusteella. Lisäksi aurinkosähkön käyttöön kannustaa kansainvälinen ympäristöluokitus (BREEAM), jossa rakennuksessa tapahtuva uusiutuvan energian tuotanto parantaa luokituksen pisteytystä. Aurinkosähköinvestointi voi olla myös imagoasia, mikäli kiinteistö haluaa erottua muista uusiutuvan energian tuotannolla. Taloudellista takaisinmaksuaikaa todennäköisesti lyhentää lähivuosina jatkuvasti lisääntyvä kilpailu. Suomen markkinoilla on nykyään useita aurinkosähkötöimittäjiä ja takaisinmaksuajat ovat lyhentyneet merkittävästi viimeisten viiden vuoden aikana.

Aurinkosähköpaneelien asennuspaikat ovat tässä vaiheessa vain arvioita, koska lopullista rakennuskantaa ja rakennusmuotoa ei ole vielä päätetty. Tässä tutkitaan tapausta, jossa rakennuksen kattopinta-alasta on hyödynnetty mahdollisimman suuri osa paneeleille.

Laskennassa on myös oletettu asennettavien paneelien olevan piikennopaneeleja. Sähköntuotannon kannalta paras ratkaisu on suunnata paneelit etelään ja kallistettuna optimikulmaan, joka on Tampereella noin 45° vaakatasosta.

Tässä on oletuksena 265 W_p:n aurinkopaneelien käyttö. Kesällä sähköntuotto on hyvää tasoa, mutta talvella tuotto on vähäistä. Jäähdytyksen aiheuttamia huippuja sähkön ostossa kesällä on mahdollista leikata aurinkosähköjärjestelmän avulla. Aurinkosähköjärjestelmän elinkaari on noin 30-35 vuotta.

Oletetaan tässä, että rakennusten eteläpuolella ei ole korkeampia rakennuksia, jotka saattaisivat varjostaa katolle asennettuja aurinkopaneeleja.

Kuten aiemmin mainittiin, oletuksena tässä on, että kattopinta-alasta hyödynnetään paneeleille mahdollisimman suuri osa. Asuinkerrostalon kattopinta-ala on 475 m² ja toimistorakennuksen kattopinta-ala on 540 m².

Alla olevassa taulukossa on esitetty aurinkopaneelien asennukseen tarvittava pinta-ala-arvio, paneelien määrä, aurinkosähköjärjestelmän kapasiteetti sekä energiantuotanto.

Taulukko 5. Aurinkopaneelien asennukseen tarvittava pinta-ala, paneelien määrä, aurinkosähköjärjestelmän kapasiteetti sekä energiantuotanto.

| | Kattopinta-ala [m ²] | Paneelipinta-ala [m ²] | Paneelien määrä | Kapasiteetti [kW _p] | Sähköntuotto [MWh/a] |
|------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|------------------------------------|-------------------------|
| Kerrostalo | 475 | 317 | 198 | 52 | 46,8 |
| Toimistorakennus | 540 | 360 | 225 | 60 | 54 |

Aurinkosähköjärjestelmän sähköntuotanto vaihtelee voimakkaasti vuodenaikojen välillä. Suurinta tuotanto on huhtikuusta elokuuhun.

Aurinkosähköjärjestelmän kustannukset painottuvat investointivaiheeseen. Järjestelmän käyttökustannukset ovat vähäiset verrattuna investointikustannuksiin. Investointiin on mahdollista saada maksimissaan 25 %:n tuki Työ- ja elinkeinoministeriöltä (TEM). Investointikustannukset perustuvat suomalaisiin aurinkosähköasennusten hintoihin. Arvonlisävero ei sisälly kustannuksiin.

Taulukossa 6 on esitetty investointikustannukset rakennusten katoille asennettaville, kapasiteeiltaan 52 kW_p:n ja 60 kW_p:n, järjestelmille. Taulukossa on annettu kustannukset ilman investointitukea ja investointituen kanssa. Tuen suuruus tässä on 25 % investointikustannuksista.

Taulukko 6. Aurinkosähköjärjestelmien investointikustannukset ilman investointitukea ja sen kanssa.

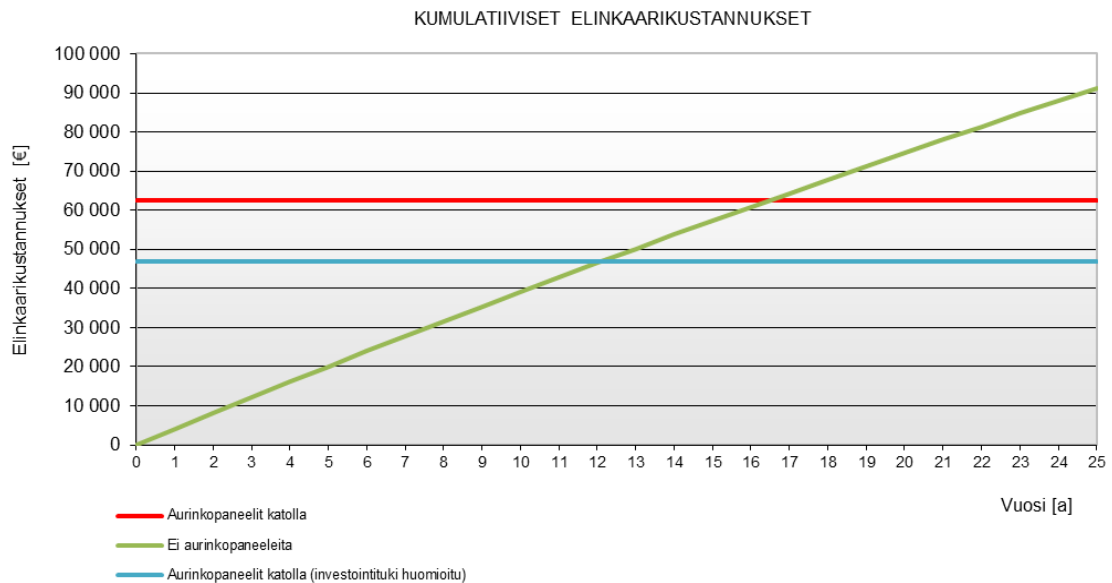
| | Investointikustannus [€] | Investointikustannus investointituki huomioituna [€] |
|--|-----------------------------|---|
| Asuinkerrostalo 52 kW _p :n järjestelmä katolla | 62 400 | 46 800 |
| Toimistorakennus 60 kW _p :n järjestelmä katolla | 72 000 | 54 000 |

Investointikustannusarvio perustuu aurinkosähkön toimittajilta saatuihin tarjouksiin. Hinta sisältää kaiken tarvittavan, kuten paneelit, laitteet, asennuksen ja suunnittelun avaimet käteen –periaatteella.

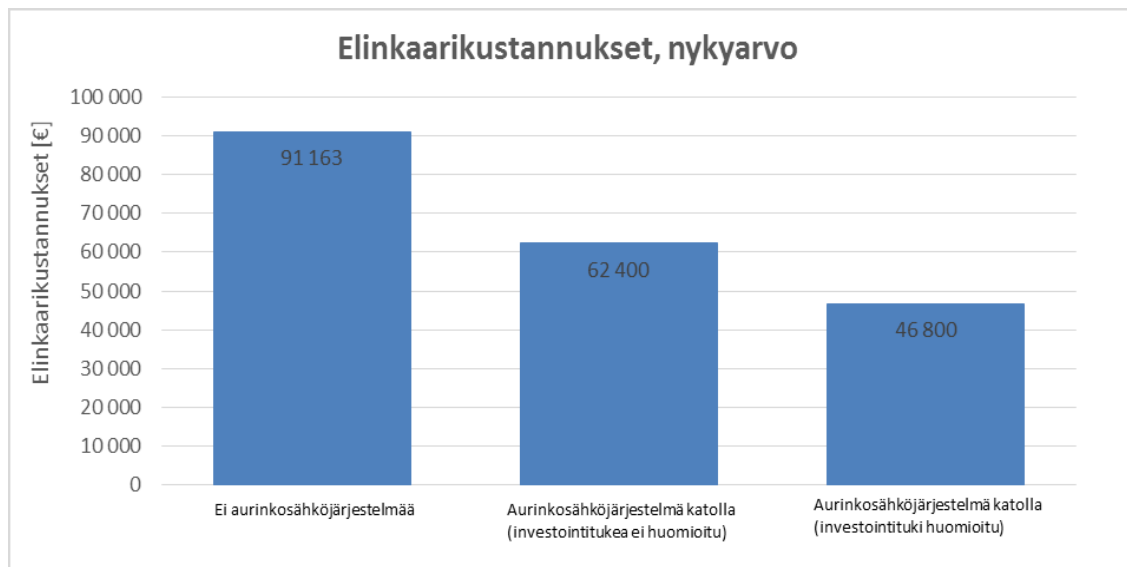
Kuvissa 95 ja 96 on esitetty kerrostalon laskentavaihtoehtojen elinkaarikustannukset ja kuvissa 97 ja 98 vastaavasti toimistorakennuksen laskentavaihtoehtojen elinkaarikustannukset. Tarkastelujakso on 25 vuotta. Tässä ei ole huomioitu huoltamisen tarvitsemaa lisäinvestointia. Laskennassa käytetty 52 kW_p:n järjestelmä pienentää vuotuisia sähkökustannuksia 4212 € ja 60 kW_p:n järjestelmä 4860 €. Elinkaarikustannuslaskennassa on käytetty seuraavia tietoja:

- Sähkön hintana on käytetty 90 €/MWh. Hinta sisältää energian, siirron ja sähköveron. Hintatiedot on saatu Tampereen Sähkölaitoksen sivuilta.
- Sähkön hinnan vuotuiseksi nousuksi on arvioitu 2 %.
- Laskentakorkona eli investoinnin tuottovaatimuksena on käytetty 3 %.

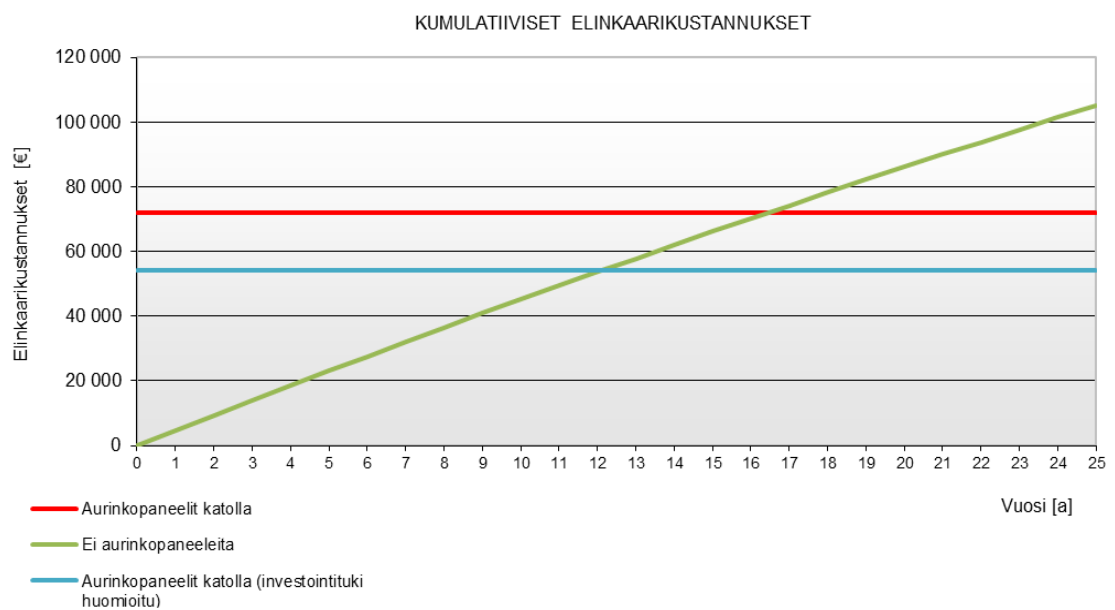
Kuvaajien luotettavuuden kannalta elinkaarikustannusten vertailu on tehty siten, että aurinkopaneelien tuottamaa sähköenergiaa verrataan energiayhtiöltä ostettavaan yhtä suureen energiamäärään. Kuvaajiin ei ole tästä syystä sisällytetty kiinteistön vuotuisia sähköenergiakustannuksia.



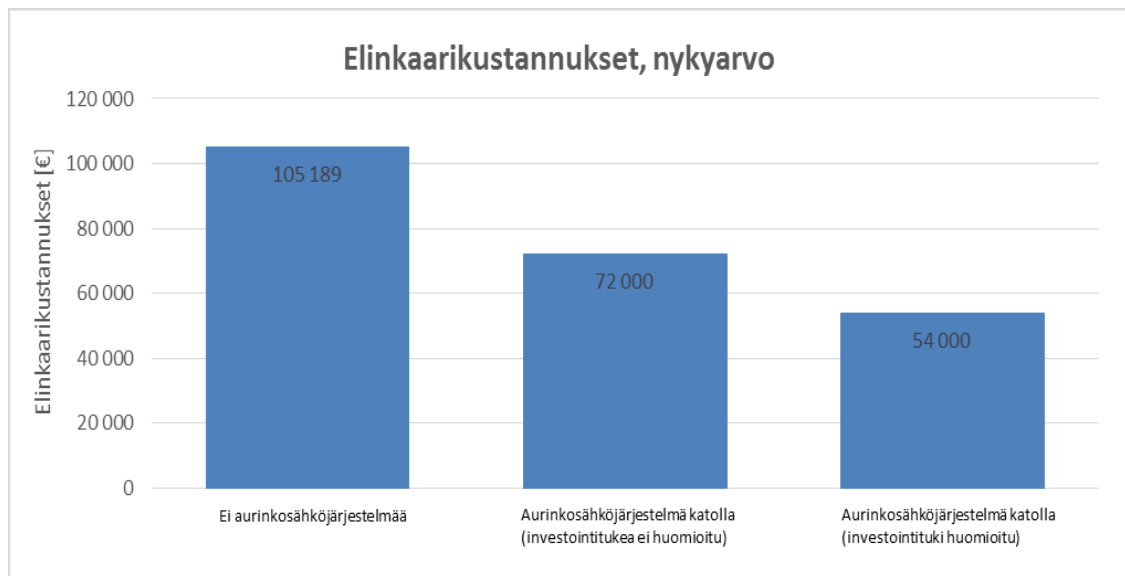
Kuva 95. Kerrostalon laskentavaihtoehtojen kumulatiiviset elinkaarikustannukset 25 vuoden ajalta.



Kuva 96. Kerrostalon laskentavaihtoehtojen elinkaarikustannusten nykyarvo 25 vuoden ajalta.



Kuva 97. Toimistorakennuksen laskentavaihtoehtojen kumulatiiviset elinkaarikustannukset 25 vuoden ajalta.



Kuva 98. Toimistorakennuksen laskentavaihtoehtojen elinkaarikustannusten nykyarvo 25 vuoden ajalta.

Sekä kerrostalon että toimistorakennuksen aurinkosähköjärjestelmä maksaa itsensä takaisin 16 vuoden jälkeen, kun energiainvestointitukea ei huomioida. Jos tuki huomioidaan, järjestelmän takaisinmaksuaika on 12 vuotta.

5 Johtopäätökset

Tässä työssä oli tarkoituksena selvittää Tampereen uuteen kaupunginosaan, Hiedanrantaan, eri lämmitys- ja jäähdytysvaihtoehtoista niin yhdelle kerrostalolle kuin koko korttelille elinkaarikustannuksiltaan kannattavin ratkaisu ottaen huomioon myös eri vaihtoehtojen hiilidioksidipäästöt. Energiantuotantovaihtoehtoiksi valikoitui kaukolämpö ja kaukojäähdytys, kaukolämpö ja koneellinen jäähdytys, maalämpö ja maaviileä sekä kaukolämpö ja vesistöjäähdytys.

Työn tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuuskatsausta sekä asiantuntijoiden haastatteluja. Kirjallisuuskatsauksen aineistona hyödynnettiin tieteellisiä artikkeleita ja tutkimusraportteja. Tutkimusosan energiankulutukset ja tehontarpeet saatiin simuloimalla valitut rakennukset IDA ICE –simulointiohjelmalla sekä RIUSKA-simulointiohjelmalla.

Tuloksien myötä oli tarkoituksena saada tietoa alueen energiantuotannosta vastaavalle taholle eri ratkaisujen kustannustehokkuus sekä ympäristöystävällisyys. Lisäksi pyrki myksenä oli vastata tutkimuskysymykseen ”kannattaako yksittäisen talonyhtiön tehdä investointeja hiilidioksidipäästöjen pienentämiseksi, mikäli paikallisella energiayhtiöllä on tavoitteena olla hiilineutraali vuonna 2050?”.

Tutkimuksen perusteella sekä kaukolämmön ja vesistölämmön että maalämmön ja maaviileän hankintakustannukset ovat huomattavasti kalliimmat verrattuna kaukolämpöön ja kaukojäähdytykseen tai kaukolämpöön ja koneelliseen jäähdytykseen. Maalämpölaitteiden kehitys on kuitenkin ollut merkittävää, ja nykyiset maalämpöjärjestelmät ovat jo kustannuksiltaan kilpailukykyisiä muihin järjestelmiin verrattuna. Kilpailu maalämpöalalla on saanut hinnat entisestään laskuun.

Tutkimus osoitti, että maalämmön ja maaviileän käyttökustannukset ovat muihin vaihtoehtoihin verrattuna huomattavasti pienemmät. Tästä syystä maalämmön ja maaviileän yhteisjärjestelmä saavuttaa samat kokonaiskustannukset muiden järjestelmien kanssa viimeistään 11. vuoden aikana, josta eteenpäin maalämpö ja maaviileä on energiantuotantovaihtoehtoista edullisin. Lisäksi maalämmön ja maaviileän hiilidioksidipäästöt ovat molemmissa tutkimustapauksissa pienimmät.

Tampereen Sähkölaitos –konsernin strategiassa keskeisiä asioita ovat ympäristövaikutusten vähentäminen ja ympäristöstä huolehtiminen. Tampereen Sähkölaitos on luonut hankkeen ”Tampereen energiakäännö”, ja toteuttanut tuotannonrakenteen ja polttoainejakautuksen uudistuksen. Energiakäännö sisältää tavoitteen lisätä uusiutuvilla energialähteillä tuotettua energiaa, vähentää hiilidioksidipäästöjä sekä lisätä työpaikkoja Pirkanmaalle puun toimitusketjuun. Sähkölaitoksen tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 45 prosentilla ja nostaa uusiutuvien energialähteiden osuus 43 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä.

Tampereella on myös oma ilmastostrategiansa pohjautuen EU-direktiiveihin, hallituksen ilmasto- ja energiastrategiaan sekä valtakunnallisiin linjauksiin – ”Hiilineutraali Tampere 2050”. Tavoitteena on Tampereen kaupunkiseudun kokonaispäästöjen 30 % vähennys vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasosta sekä samaiseen vuoteen mennessä 40 % vähennys CO₂-päästöihin asukasta kohden. Vuoden 2050 tavoite on hiilineutraalisuus,

mikä tarkoittaa 80 % hiilidioksidipäästöjen vähennystä ja lopun 20 % sitomista kasvillisuuteen.

Näin ollen on pikemminkin mielipidekysymys, kannattaako yksittäisen talonyhtiön tehdä investointeja hiilidioksidipäästöjen pienentämiseksi. Tampereen Sähkölaitos on kovaa vauhtia menossa kohti hiilineutraalia energiantuotantoa, ja samalla Tampereen kaupungilla on tavoite olla täysin hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Koska kyseessä on uudisrakennukset, päästöjen pieneminen ei tapahdu varsinaisesti nykytilaan verrattuna, vaan suhteessa toisen energiantuotantovaihtoehdon valintaan.

Investointi maalämpöön ja maaviileään toki kannattaisi, huolimatta korkeammista investointikustannuksista muihin energiantuotantovaihtoehtoihin verrattuna, koska sekä kerrostalotapauksessa että korttelitapauksessa järjestelmä tulee edullisimmaksi vaihtoehdoksi viimeistään 11. käyttövuoden aikana, kerrostalotapauksessa jo kuudennen käyttövuoden aikana. Tutkimuksessa sähkön hinnan vuotuiseksi nousuksi arvioitiin 2 %, ja hinta saa tulevaisuudessa kallistua merkittävästi kaukolämmön hintaa enemmän, ennen kuin kaukolämmöstä tulee edullisempi vaihtoehto pitkällä aikavälillä. Maalämmön ja maaviileän hiilidioksidipäästöt olivat tutkimuksessa muita vaihtoehtoja pienemmät, ja kun Tampereen Sähkölaitos pyrkii yhä enenevässä määrin kohti vähäpäästöistä ja uusiutuvilla energialähteillä tuotettua energiaa, myös sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt pienenevät, ja näin ollen maalämpöjärjestelmienkin hiilidioksidipäästöt pienenevät.

Lähdeluettelo

Airaksinen, M. et al. 2015. Rakennusten jäähdytysmarkkinat. VTT asiakasraportti Energiateollisuus ry:n käyttöön. [Verkkojulkaisu]. 48 s. [Viitattu 18.4.2017]. Saatavissa: https://energia.fi/files/399/Rakennusten_jaahdytysmarkkinat_18-12-2015.pdf

Aitola, K. 2012. Carbon nanomaterials as counter electrodes for dye solar cells. [Verkkodokumentti]. Väitöskirja. Aalto-yliopisto, teknillisen fysiikan laitos. Espoo. 82 s. [Viitattu 20.5.2017]. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Diss/2012/isbn9789526046280/isbn9789526046280.pdf>. ISBN 978-952-60-4628-0 (sähköinen)

Aurinkoteknillinen yhdistys ry. Aurinko-opas. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 23.5.2017]. Saatavissa: http://www.aurinkoteknillinenyhdistys.fi/?page_id=168

Bayer, P. et al. 2011. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump system in Europe: A review. Renewable and sustainable energy reviews. [Verkkolehti]. Vol. 16:2. S. 1256-1267. [Viitattu 23.2.2017]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.027>

Bernier, M. 2006. Closed-loop ground-coupled heat pump systems. ASHRAE journal. [Verkkolehti]. Vol. 48:9. S. 8. [Viitattu: 21.2.2017]. ISSN 00012491. Saatavissa: <https://search.proquest.com/docview/220461151?accountid=27468>

Blum, P. et al. 2009. CO₂ savings of ground source heat pump systems - A regional analysis. Renewable energy. [Verkkolehti]. Vol. 35:1. S. 122-127. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.03.034>

BREEAM. What is BREEAM? [www-sivuilla]. [Viitattu 17.8.2017]. Saatavissa: <http://www.breeam.com/>.

Building materials online. Thin film solar panel. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 29.5.2017]. Saatavissa: <https://buildingmaterials.com.my/materials/thin-film-solar-panel>

Cho, Y. & Yun, R. 2011. A raw water source heat pump air-conditioning system. Energy and buildings. [Verkkolehti]. Vol. 43:11. S. 3068-3073. [Viitattu 9.1.2017]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.028>

Conibeer, G. et al. 2006. Silicon nanostructures for third generation photovoltaic solar cells. Thin solid films. [Verkkolehti]. Vol. 511-512. S. 654-662. [Viitattu 29.5.2017]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.12.119>

Elinkeinoelämän keskusliitto. Energiaunioni – päätöksiä EU:n energia- ja ilmastopolitiikasta vuoteen 2030. [Elinkeinoelämän keskusliiton www-sivuilla]. [Viitattu 2.3.2017]. Saatavissa: <https://ek.fi/mita-teemme/energia-liikenne-jaymparisto/energia/energiaunioni/>

Energiateollisuus. 2017. Kaukojäähdytyksessä ennätysmyynti viime vuonna. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 6.4.2017]. Saatavissa:

http://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukojaahdytykseen_ennatysmyynti_viime_vuonna.html

Energiateollisuus, a. Kustannustehokasta ja ympäristöystävällistä kaukojäähdytystä. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 18.4.2017]. Saatavissa: http://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/kaukojaahdytys

Energiateollisuus, b. Kaukolämpö tuotetaan lähellä asiakasta. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 4.4.2017]. Saatavissa: http://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/kaukolammon_tuotanto

Energiateollisuus, c. Kaukolämpötilastot. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 4.4.2017]. Saatavissa: http://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/tilastot/kaukolampotilastot

Energiateollisuus, d. Kaukolämpöverkkoja lähes 15000 km. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 4.4.2017]. Saatavissa: http://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/kaukolampoverkot

Energiateollisuus, e. Aurinkosähkö. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 29.5.2017]. Saatavissa: http://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/aurinkovoima

Energiateollisuus, f. Sähköntuotanto. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 2.6.2017]. Saatavissa: http://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto

EUR-Lex. 2010. Access to European Union law. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU rakennusten energiatehokkuudesta. [Verkkajulkaisu]. 23 s. [Viitattu 5.5.2017]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:fi:PDF>

EUR-Lex. 2015. Access to European Union law. Rakennusten energiatehokkuus. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.5.2017]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=LEGISSUM:en0021>

Euroopan komissio. 2009. Euroopan parlamentin ja neuvoston päätös N:o 406/2009/EY. Euroopan unionin virallinen lehti. 13 s. [Viitattu 23.2.2017]. Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/dec/2009/406/oj>

European parliament. 2009. The Lisbon Special European Council (March 2000): Towards a Europe of Innovation and Knowledge. European commission. [Viitattu 23.2.2017]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=URISERV:c10241>

Finlex. 1999. Maankäyttö- ja rakennuslaki (1999/132). [Verkkajulkaisu]. Saatavissa: <http://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>

Finlex. 2011. Vesilaki (587/2011) 4§. Lainsäädäntö. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 28.4.2017]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110587>

Fraas, L. & Partain, L. 2010. Solar cells and their applications. 2nd ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Ltd. 627 s. ISBN 978-1-118-02405-8 (sähköinen).

Geologian tutkimuskeskus, a. Maankamara. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 15.9.2017]. Saatavissa: <http://www.gtk.fi/tietopalvelut/palvelukuvaukset/maankamara.html>

Geologian tutkimuskeskus, b. Hakku-palvelu. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 18.9.2017]. Saatavissa: <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>

Geologian tutkimuskeskus. 2008. Maa- ja kalliolämpö - uusiutuvaa energiaa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 1.6.2017]. Saatavissa: <http://www.gtk.fi/export/sites/fi/ajankohtaista/viestintamateriaalit/esitteet/MessuEsite.pdf>

Geologian tutkimuskeskus. 2015. Keski-Suomen geoenergiapotentiaali. [Verkkajulkaisu]. 30 s. [Viitattu 16.1.2017]. Saatavissa: https://www.keskisuomi.fi/filebank/24387-Keski-Suomen_geoenergiapotentiaali_4162018_loppuraportti.pdf

Grätzel, M. 2003. Dye-sensitized solar cells. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 4:2. S. 145-153. [Viitattu 22.5.2017]. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S1389-5567\(03\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S1389-5567(03)00026-1)

Heinonen, J. et al. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy. 374 s. ISBN 978-952-99770-6-2

Helen Oy. 2017. Energian ominaispäästöt. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 20.7.2017]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/tietoa-yrityksesta/energiantuotanto/sahkon-jal-lammon-ominaispaastot/>

Hämeenkyrön Iso-Lehmijärven suojeluyhdistys ry. Järven ominaisuudet. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.5.2017]. Saatavissa: <https://hakilsy.yhdistysavain.fi/jarven-kunnostushistoriaa/>

Ilmatieteen laitos, a. Lämpötila- ja sadekarttoja vuodesta 1961. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.5.2017]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/karttoja-vuodesta-1961>

Ilmatieteen laitos, b. UV-säteily. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 31.5.2017]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/uv-sateily>

Ilmatieteen laitos, c. Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 2.6.2017]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>

Juvonen, J. & Lapinlampi, T. 2013. Energiakaivo – maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. [Verkkodokumentti]. 68 s. [Viitattu 20.2.2017]. ISSN 1238-8602 (painettu). ISSN 1796-167X (sähköinen). Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf

Laitinen, A. et al. 2011. Impacts of large penetration of heat pumps on the electricity use. VTT Research report. [Verkkojulkaisu]. 65 s. [Viitattu 10.5.2017]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2011/vtt-r-03174-11.pdf>

Laitinen, A. et al. 2016. Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut. VTT asiakasraportti. [Verkkojulkaisu]. 64 s. [Viitattu 10.5.2017]. Saatavissa: https://energia.fi/files/1359/Jaahdytysteknologiaselvitys_VTT_221216.pdf

Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2014. Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 23.5.2017]. Saatavissa: http://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa

Lund, H. et al. 2014. 4th generation district heating (4ghd) integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. Energy. [Verkkojulkaisu]. Vol. 68. S. 1-11. [Viitattu 2.3.2017]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>

Luque, A. & Hegedus, S. 2003. Handbook of photovoltaic science and engineering. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd. 205 s. ISBN 0-471-49196-9 (sähköinen). Saatavissa: http://www.pm-files.com/sites/default/files/file/C/C-2/C-2-2/C-2-2-2/2_2_2_1_handbook.pdf

Lämpöeko Oy. Maalämpö, lämmönlähteet. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 11.5.2017]. Saatavissa: <http://www.lampoeko.fi/lampolahteet/>

Metsähallitus. Retkikartta. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 18.9.2017]. Saatavissa: <https://www.retkikartta.fi/>

Motiva. 2010. Konesalipalvelujen energiatehokkuuden periaatteet. Selvitys IT-ympäristön sähkönsäästökeinoista. [Verkkojulkaisu]. 13 s. [Viitattu 18.4.2017]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/4427/Konesalipalvelujen_energiatehokkuuden_periaatteet.pdf

Motiva. 2012. Lämpöä omasta maasta - Maalämpöpumput. [Verkkojulkaisu]. 16 s. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/lammitysjarjestelmat/lampoa_omasta_maasta_maalampopumput.10752.shtml

Motiva. 2016a. Viihtyisä työympäristö – Ilmastointi ja jäähdytys. [Verkkojulkaisu]. 24 s. [Viitattu 17.4.2017]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/kaikki_julkaisut/viihtyisa_tyoymparisto_ilmastointi_ja_jaahdytys.9236.shtml

Motiva. 2016b. Auringosta lämpöä ja sähköä. [Verkkojulkaisu]. 16 s. [Viitattu 26.5.2017]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/12322/Auringosta_lampoa_ja_sahkoa_2016.pdf

Motiva. 2016c. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 24.5.2017]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa

Motiva. 2017a. Uusiutuva energia Suomessa. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 27.4.2017]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa

Motiva. 2017b. Aurinkosähköteknologiat. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 29.5.2017]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat

Motiva. 2017c. Aurinkolämpöjärjestelmät. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 1.6.2017]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat

Motiva. 2017d. CO₂-päästökertoimet. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 20.7.2017]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energian kulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet

NASA. 2015. Solar arrays on the international space station. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 23.5.2017]. Saatavissa: <https://www.nasa.gov/content/solar-arrays-on-the-international-space-station>

Partanen, P. 2011. TEK verkkolehti. Valo korvasi kuumuuden ja kemikaalit. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 22.5.2017]. Saatavissa: <https://teknet.tek.fi/arkisto.lehti/node/1098.html>

Power, E. et al. 2010. Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report. Geothermics. [Verkkolehti]. Vol. 41. S. 1-29. [Viitattu 8.5.2017]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.10.001>

Ramboll Finland Oy. 2016. Uusiutuvan energian kuntakatselmus, Tampereen kaupunki. [Verkkojulkaisu]. 87 s. [Viitattu 5.6.2017]. Saatavissa: http://www.tampere.fi/tiedostot/c/xDS1HRxnb/UEKK_Tampere_08062016.pdf

Rawlings, R. & Sykulski, J. 1999. Ground source heat pumps: A technology review. Building Services Engineering Research and Technology. [Verkkolehti]. Vol. 20:3. S. 119-129. [Viitattu 24.2.2017]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/014362449902000304>

Sanner, B. et al. 2003. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. Geothermics. [Verkkolehti]. Vol. 32:4-6. S.579-588. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavissa: [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00060-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00060-9)

Sarbu, I. & Sebarchievici, C. 2013. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. Energy and buildings. [Verkkolehti]. Vol. 70. S. 441-454. [Viitattu 30.1.2017]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>

Savonlinnan lämpöpumppu Oy. Porakaivo- ja keruupiirit. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 11.5.2017]. Saatavissa: <http://savonlinnanlampopumppu.fi/porakaivot-ja-keruupiirit/maapiirit/>

Self, S. et al. 2012. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. Applied energy. [Verkkolehti]. Vol. 101. S. 341-348. [Viitattu 21.2.2017]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048>

Solargis. World solar resource maps. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 26.5.2017]. Saatavissa: <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/world>

Solar tech USA. Types of solar cells. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 29.5.2017]. Saatavissa: <http://www.solartech-usa.com/types-of-solar-cells>

Solpros Ay. 2006. Aurinkolämpöjärjestelmien perusteet, mitoitus ja käyttö. EU-projekti: Extend accredited renewables training for heating (EARTH). [Verkkojulkaisu]. 20 s. [Viitattu 23.5.2017]. Saatavissa: <http://www.kolumbus.fi/solpros/reports/OPAS.pdf>

Suntekno. Aurinkopaneelit. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 29.5.2017]. Saatavissa: <http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>

Suomen lämpöpumppuyhdistys Sulpu ry. Suomen lämpöpumpputilastot, vuosi 2016. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 11.5.2017]. Saatavissa: <http://www.sulpu.fi/tilastot>

Tampereen kaupunki. 2014. Tampereen kaupungin rakennusjärjestys. [Verkkojulkaisu]. 40 s. [Viitattu 5.6.2017]. Saatavissa: <http://www.tampere.fi/liitteet/t/NVy1Nreto/rakennusjarjestys2014.pdf>. ISBN 978-951-609-752-0 (painettu). ISBN 978-951-609-753-7 (sähköinen).

Tampereen kaupunki. 2016a. Julkisivumuutokset. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 6.6.2017]. Saatavissa: <http://www.tampere.fi/asuminen-ja-ymparisto/rakentaminen/rakennusvalvonta/laitjaohjeet/julkisivumuutokset.html>

Tampereen kaupunki. 2016b. Tampereen kaupunkikonsernin energia- ja ilmastotoimien raportti 2015. [Verkkojulkaisu]. 135 s. [Viitattu 5.6.2017]. Saatavissa: http://www.tampere.fi/tiedostot/e/slMeGbX7D/Raportti_2015_30052016.pdf

Tampereen kaupunki. 2017. CO2-raportti. [Verkkojulkaisu]. 57 s. [Viitattu 5.6.2017]. Saatavissa: http://www.tampere.fi/tiedostot/c/wA30itBf9/CO2-raportti_Tampere_24022017.pdf

Tampereen kaupunki, a. Hiedanranta. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 4.6.2017]. Saatavissa: <http://www.tampere.fi/asuminen-ja-ymparisto/kaupunkisuunnittelu-ja-rakentamishankkeet/hiedanranta.html>

Tampereen kaupunki, b. Tampereen ilmastotavoitteet. [Verkkajulkaisu]. 46 s. [Viitattu 4.6.2017]. Saatavissa: http://www.tampere.fi/tiedostot/c/ypnsOxUjL/treilstra-arviointi_raportti_tiivis_160812.pdf

Tampereen kaupunki, c. Hiedanrannan ideakilpailu - kilpailutyöt. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.6.2017]. Saatavissa: <https://koppa.tampere.fi/alfresco/service/com/eduiX/imageGallery-ui/4a72ef1f-0aae-473c-953b-1b10d083784f>

Tampereen kaupunki d. Hiilineutraali Tampere 2050. Ilmasto- ja energiatiekartan taustatietoa. [Tampereen kaupungin pdf-esitys]. [Viitattu 7.3.2017]. Saatavissa: <https://d2htbfmhc6rwjj.cloudfront.net/attachments/9/9/5/3c776f75a4e058836eb482a19a6d7.pdf>

Tampereen Sähkölaitos Oy. 2017a. Tampereen sähkölaitoksen vuosi 2016 -julkaisu. 43 s.

Tampereen Sähkölaitos Oy. 2017b. Järvijäähdytys Tampereella. [PDF-esitys]. 28 s.

Tampereen Sähkölaitos Oy, a. Lämpö. [Tampereen sähkölaitoksen www-sivuilla]. [Viitattu 14.4.2017]. Saatavissa: <https://www.tampereensahkolaitos.fi/kaukolampojaahdytysjamaakaasu/lampo/Sivut/default.aspx#.WT5zelWLREY>

Tampereen Sähkölaitos Oy, b. Kaukolämmön alkuperä. [Tampereen sähkölaitoksen www-sivuilla]. [Viitattu 14.4.2017]. Saatavissa: <https://www.tampereensahkolaitos.fi/kaukolampojaahdytysjamaakaasu/lampo/kaukol%C3%A4mm%C3%B6n%20alkuper%C3%A4/Sivut/default.aspx#.WT50EFWLREY>

Tampereen Sähkölaitos Oy, c. Jäähdytys. [Tampereen sähkölaitoksen www-sivuilla]. [Viitattu 14.4.2017]. Saatavissa: <https://www.tampereensahkolaitos.fi/kaukolampojaahdytysjamaakaasu/jaahdytys/Sivut/default.aspx#.WUtgo1WLSpo>

TEM. Energia- ja investointituet. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 17.8.2017]. Saatavissa: <http://tem.fi/tuen-enimmaismaarat>

Thompson, J. 2016. Software, hardware, art - a blog of process and findings. Polycrystalline silicon. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 20.5.2017]. Saatavissa: <https://www.jeffreythompson.org/blog/2016/12/16/polycrystalline-silicon/>

Tilastokeskus. 2016a. Lämmin sää laski asumisen energiankulutusta vuonna 2015. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 24.4.2017]. Saatavissa: http://www.tilastokeskus.fi/til/asen/2015/asen_2015_2016-11-18_tie_001_fi.html

Tilastokeskus. 2016b. Asumisen energiankulutus energialähteittäin vuonna 2015. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.4.2017]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/asen/2015/asen_2015_2016-11-18_kuv_001_fi.html

Tilastokeskus. 2016c. Asumisen energiankulutus käyttökohteittain vuonna 2015. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 25.4.2017]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/asen/2015/asen_2015_2016-11-18_kuv_002_fi.html

Tilastokeskus. 2016d. Uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön määrä ennätystasolla. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 25.4.2017]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/salatuo/2015/salatuo_2015_2016-11-02_tie_001_fi.html

Tilastokeskus. 2017a. Kaukolämmön tuotanto 1970–2016. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 24.4.2017]. Saatavissa: http://www.tilastokeskus.fi/til/ehk/2016/04/ehk_2016_04_2017-03-23_kuv_018_fi.html

Tilastokeskus. 2017b. Energian kokonaiskulutus nousi 2 prosenttia vuonna 2016. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 9.5.2017]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehk/2016/04/ehk_2016_04_2017-03-23_tie_001_fi.html

Tindo solar. Poly vs mono crystalline. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 30.5.2017]. Saatavissa: <http://www.tindosolar.com.au/learn-more/poly-vs-mono-crystalline/>

Tuovinen, S. 2012. Alueellinen energiatasemalli. [Verkkodokumentti]. Diplomityö. Lappeenrantaan teknillinen yliopisto, ympäristötekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. 95 s. [Viitattu 8.5.2017]. Saatavissa: http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/77390/Diplomityo_STu.pdf?sequence=1

United States Department of Energy. Geothermal Heat Pumps. [Viitattu 20.1.2017]. Saatavissa: <https://energy.gov/energysaver/geothermal-heat-pumps>

Viholainen, J. et al. 2016. Regional level approach for increasing energy efficiency. Applied energy. [Verkkolehti]. Vol. 163. S. 295-303. [Viitattu 8.5.2017]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.101>

Ympäristöhallinto. 2013. Pienten vesirakennustöiden luvanvaraisuus. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 5.6.2017]. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesien_kaytto/Pienet_vesirakennustyot

Ympäristöministeriö. 2011. Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. [Ympäristöministeriön www-sivuilla]. [Viitattu 8.5.2017]. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus

Ympäristöministeriö. 2012. Kesäajan huonelämpötilan vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen, D3 laskentaopas. [Ympäristöministeriön www-sivuilla]. 27 s. [Viitattu 20.6.2017]. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus

Ympäristöministeriö. 2013. Euroopan unionin ilmastopolitiikka. [Ympäristöministeriön www-sivuilla]. [Viitattu 2.3.2017]. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Euroopan_unionin_ilmastopolitiikka

Ympäristöministeriö. 2015. Ilmansuojelu ja otsonikerroksen suojele. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 27.3.2017]. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmansuojelu_ja_otsonikerroksen_suojele

Ympäristöministeriö. 2016a. Jäähdytysjärjestelmien energialaskentaopas 2011. Rakentamismääräyskokoelman energiatehokkuutta koskeva osa. 26 s. [Viitattu 18.4.2017]. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BB9D6D2F2-A816-4ECF-BE33-B8D56869253D%7D/30752>

Ympäristöministeriö. 2016b. Energiatodistusopas 2016. Rakennuksen energiatodistus ja kokonaisenergiankulutuksen määrittäminen. Versio 1.7.2016. [Verkojulkaisu]. 38 s. [Viitattu 2.5.2017]. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuksen_energia_ja_ekotehokkuus/Rakennuksen_energiatodistus/Energiatodistuslomakkeet

Ympäristöministeriö. 2017. Lähes nollaenergiarakentamisen lainsäädännön valmistelu. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 3.5.2017]. Saatavissa: <http://www.ym.fi/lahesnollaenergiarakentaminen>